

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Komplexní zkoušky nízkonapětových asynchronních
elektromotorů**

The Complex Testing of Low-Voltage Asynchronous Motors

Student:

Bc. František Škop

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et. Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání:

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. František Škop**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Komplexní zkoušky nízkonapěťových asynchronních elektromotorů**
The Complex Testing of Low-Voltage Asynchronous Motors

Zásady pro vypracování:

1. Konstrukce elektromotorů a využití v praxi.
2. Návrh zkoušení elektromotorů.
3. Měření dat.
4. Vyhodnocení naměřených dat.
5. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DUŠÁK, K. *Technologie montáže. Základy*. 1. vyd. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2005. 116 s. ISBN 80-7083-906-6.
- [2] PETRŮ, J.; ČEP, R. *Základy montáže*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. s. 123. ISBN 978-80-248-2773-5.
- [3] HENZOLD, G. *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. Amsterdam : Butterworth-Heinemann, 2006, 411 s. ISBN 978-07-506-6738-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
- [5] WHITNEY, Daniel E. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford : Oxford University Press, USA, 2004. 544 p. s. ISBN 978-01-951-5782-6.

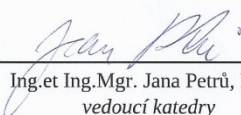
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 12.5.2014

Podpis studenta František Škop



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 12.5.2014

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. František Škop

Adresa trvalého pobytu autora práce: Loštice, Kašparova 435/12



Obsah

Seznam použitého značení.....	7
Úvod	9
1. Konstrukce asynchronních elektromotorů a využití v praxi.....	11
1.1 Rozdíl mezi synchronními a asynchronními elektromotory	19
1.2 Společnost Siemens s.r.o., Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice	21
1.3 Ložiska SKF E2	22
1.4 Mazání valivých ložisek	24
1.5 Vady valivých ložisek.....	27
1.6 Montáž ložisek	32
2. Návrh zkoušení elektromotoru	36
2.1 Základní mechanická měření statoru a rotoru, ověření vzduchové mezery.....	37
2.2 Praktická montáž ložisek.....	40
2.3 Montáž elektromotoru	43
3. Měření dat.....	46
3.1 Měření hladiny mohutnosti vibrací dle normy ČSN EN 60034 – 14.....	46
3.2 Ověření hlučnosti dle normy ČSN EN ISO 3745	53
3.3 Stanovení účinnosti elektromotoru dle normy ČSN EN 60034 – 2 – 1	60
3.4 Teploty ložisek a elektromotoru v ustáleném stavu při jmenovitém výkonu.....	63
4. Ekonomické zhodnocení použití vysokoúčinnostních ložisek SKF E2	71
Závěr diplomové práce.....	72
Poděkování.....	75
Seznam použité literatury	76



ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠKOP, F. *Komplexní zkoušky nízkonapěťových asynchronních elektromotorů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 79 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá komplexními zkouškami nízkonapěťových asynchronních elektromotorů, které jsou potřebné k prokázání jejich vlastností při osazení různými ložisky. Práce se ve svém úvodu zabývá konstrukcí elektromotorů společně s jejich využitím pro technickou praxi a představením výrobce elektromotorů společností Siemens elektromotory o.z. Mohelnice, kde jsou měření prováděna. Praktická část diplomové práce se bude zabývat veškerými zkouškami elektromotorů, které jsou nutné k prokázání vlastností elektromotorů, které jsou osazeny různými ložisky, jako je měření vibrací, hluku, měření vnitřních teplot, účinnosti a ztrát. V závěrečné části diplomové práce bude uvedeno zhodnocení těchto zkoušek a celkové vyhodnocení všech naměřených dat.

ANOTATION OF MASTER THESIS

ŠKOP, F. *The complex testing of low-voltage asynchronous motors*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 79 p. Thesis supervisor: Petrů, J.

The master thesis deals with the complex testing of low-voltage asynchronous motors which are required to prove their properties when equipped with the different bearings. The master thesis deals with introduction of construction asynchronous motors together with their use for the technique practice and introduction of producer elektromotors companies Siemens elektromotory o.z. Mohelnice, wherein the measurements are made. The practice part of masters thesis will deal with all tests, that are required demonstrate the properties of electromotors, which are mounted the different bearings, such as measurement noise, measuring internal temperatures and efficiency and all losses. In the final part of master thesis will describe the evaluation of these tests and the overall evaluation of all measured data.

Seznam použitého značení

Označení	Význam	Jednotky
v_{eff}	rychlost	m/s
a_{eff}	zrychlení	m/s ²
s_{eff}	výchylka	μm
W	referenční akustický výkon	W
W_0	sledovaný akustický výkon	W
L_{pf}	hladina akustického tlaku	dB (A)
L_w	hladina akustického výkonu	dB (A)
$L_{\text{pf,celk}}$	celková hladina akustického tlaku	dB (A)
$L_{w,celk}$	celková hladina akustického výkonu	dB (A)
p	akustický tlak	Pa
v	akustická rychlost	m.s ⁻¹
S	měřicí plocha	m ²
$v_{x_{\text{max}}}$	maximální efektivní hodnota rychlosti	mm/s
$a_{x_{\text{max}}}$	maximální efektivní hodnota zrychlení	m/s ²
$s_{x_{\text{max}}}$	maximální efektivní hodnota výchylky	μm
$v_{x_{\text{min}}}$	minimální efektivní hodnota rychlosti	mm/s
$a_{x_{\text{min}}}$	minimální efektivní hodnota zrychlení	m/s ²
$s_{x_{\text{min}}}$	minimální efektivní hodnota výchylky	μm
$v_{x_{\text{rms}}}$	rozhodující efektivní hodnota rychlosti	mm/s
$a_{x_{\text{rms}}}$	rozhodující efektivní hodnota zrychlení	m/s ²
$s_{x_{\text{rms}}}$	rozhodující efektivní hodnota výchylky	μm



H	osová výška elektromotoru	mm
HRC	tvrdost podle Rockwella	-
P_k	konstantní ztráty	W
P_{fe}	ztráty v železe	W
P_{fw}	ventilační, mechanické, třecí ztráty	W
P_c	konstantní ztráty	W
P_s	ztráty ve vinutí	W
PS	přední strana elektromotoru	-
ZS	zadní strana elektromotoru	-



Úvod

Dnešní lidská společnost, která je velice citlivá na kvalitu a zároveň i cenu nabízených výrobků, nutí mnoho výrobců k ústupkům v oblasti životnosti. Proto mnoho výrobků v dnešní době získává čistě spotřební charakter s jen určitou omezenou životností pouze po dobu záruky. Tento trend postihuje všechny výrobce, výrobce elektromotorů nevyjímaje, kdy někteří výrobci nabízejí levné elektromotory, které ovšem mají v mnoha případech mizivou kvalitu a s tím spojenou výdrž pro jejich použití. Společnost Siemens Elektromotory jako světový leader v oblasti výroby a vývoje elektromotorů se snaží nabízet elektromotory svým zákazníkům ve velmi vysoké kvalitě, která je podpořena mnoha vlastními zkouškami a velmi vysokou kvalitou vlastní výroby.

Diplomová práce se zabývala komplexními zkouškami nízkonapěťových asynchronních elektromotorů společnosti Siemens, kdy veškerá měření potřebná pro tuto práci byla prováděna ve společnosti Siemens elektromotory o.z. Mohelnice, který jako největší výrobce asynchronních elektromotorů s kotvou nakrátko v Evropě vyrábí elektromotory v osových výškách 63 mm až 200 mm v různých provedeních a specifikacích, které právě požadují zákazníci. V současnosti vyrábí mohelnický závod společnosti Siemens takzvané zelené elektromotory, kdy jde o nástupce motorů, ve kterých byl používán hliníkový rotor, který byl z důvodu úspor elektrické energie nahrazen takzvaným hybridním rotorem, který je kombinací hliníku a mědi a umožňuje vyhovět novým předpisům Evropské unie o spotřebě elektrické energie a zároveň spoří zákazníkům energii, čímž v konečném důsledku snižuje zákazníkům náklady na výrobu v jejich podnicích. Všechna měření potřebná pro tuto diplomovou práci budou provedena na pracovišti prototypové dílny a zkušebny společnosti Siemens Elektromotory o.z. Mohelnice, která byla vybudována v roce 2011 za přispění fondů Evropské unie a Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky.

Měření potřebná pro realizaci práce byly provedeny na elektromotorech nové tzv. zelené řady v osově výšce 132 mm, kdy zároveň byly zkoumány rozdíly mezi elektromotory osazenými standardními ložisky od společnosti ORS a elektromotory s tzv. zelenými ložisky od společnosti SKF, která jsou označována E2. Tato zelená ložiska mají zabezpečovat snadnější běh elektromotoru v porovnání se standardními ložisky, čímž zajišťují i jistou úsporu elektrické energie, což se budeme snažit prokázat v této práci za pomoci komplexních zkoušek nízkonapěťových elektromotorů. První zkouškou byla zkouška vibrační, která byla provedena dle normy ČSN EN 60034-14 na šesti místech elektromotoru, při které by se mělo

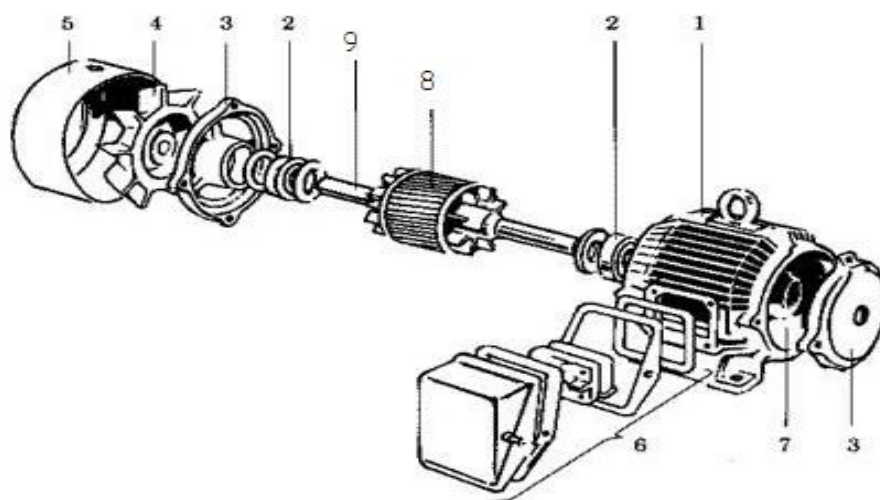


prokázat, zda motory splňují předepsané hodnoty pro vibrace. Při této zkoušce dále můžeme, prokázat provozní stav použitých ložisek Druhou zkouškou byla zkouška hluková dle normy ČSN EN ISO 3745, která byla provedena v nově zhotovené polobezodrazové protihlukové komoře ve společnosti Siemens. Po zkoušce hlukové následovala zkouška na dynamometru, na kterém jsme se snažili stanovit jeho účinnost a ztráty dle normy ČSN EN 60034 – 2 – 1, zdali elektromotor splňuje parametry uvedené na štítku. Dále bylo přistoupeno ke zkoušce, kdy byly snímány teploty na různých místech elektromotoru při jmenovitém výkonu pomocí termočlánků, kdy také byly zhotoveny termosnímky za pomoci termokamery a zároveň při tomto měření bylo provedeno snímání teploty ložisek na elektromotoru. Výsledky všech měření jsou prokazatelným výsledkem životnosti elektromotorů společnosti Siemens a zároveň nám ukážou rozdíly při použití ekologických ložisek SKF E2 v porovnání s ložisky standardně dodávanými.

1. Konstrukce asynchronních elektromotorů a využití v praxi

Asynchronní elektromotor je nejvíce užívaným pohonem v technické praxi a téměř nevyžaduje během svého technického života žádnou údržbu. Pouze po určité době je nutná kontrola stavu opotřebení a s tím související hlučnosti ložisek. Pokud již hlučnost ložisek elektromotoru překračuje určitou mez, je nutná jejich výměna za nové. Údaj o ložiskách je u renomovaných výrobců zpravidla k dohledání na výrobním štítku. V případě, že jsou ložiska krytována z obou stran, bývají bezúdržbová po celou dobu jejich technického života. V případě nekrytovaných ložisek nebo ložisek krytovaných pouze z jedné strany je možné doplnění určitého množství maziva. Konstrukce asynchronního elektromotoru je standardizovaná, proto je možné zaměňovat díly od různých dodavatelů, jako jsou šrouby nebo ložiska, jelikož jde o díly normalizované a jejich dohledání jako náhradního dílu je snadné. [1]

Asynchronní motor má dvě základní součásti, kterými jsou rotor (vinutí rotační části elektromotoru může být zhotoveno například z hliníku nebo mědi, popřípadě z jejich kombinace, v takovém případě mluvíme o tzv. rotoru hybridním) a stator (pevná část elektromotoru). [1]



Obr. 1 Asynchronní elektromotor a jeho hlavní části [1]

Části elektromotoru: (Popis jednotlivých pozic na výše uvedeném obrázku); [1]

1. Kostra elektromotoru;

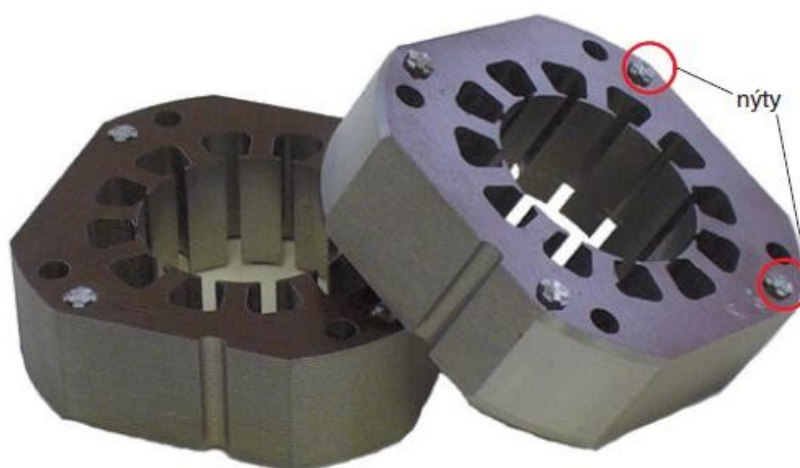


2. Zadní ložisko;
3. Zadní štít (odlitek buďto z hliníku nebo šedé litiny dle provedení elektromotoru);
4. Ventilátor (Plastový nebo hliníkový dle provedení elektromotoru);
5. Kryt ventilátoru (Plastový nebo plechový výlisek dle provedení elektromotoru);
6. Svorkovnice;
7. Satorový svazek;
8. Rotor elektromotoru;
9. Hřídel elektromotoru.

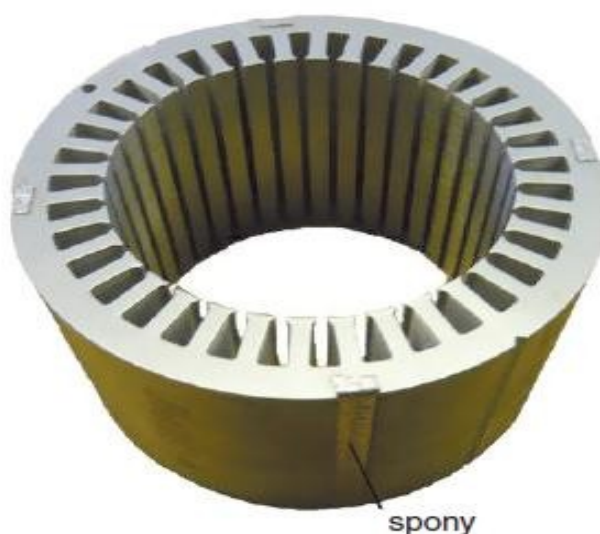
Satorový svazek je vodičem magnetického toku. Satorový svazek, pevná část elektromotoru, je nalisován v kostře, která může být dle provedení a osové výšky elektromotoru zhotovena buď z hliníku nebo ze šedé litiny. Nalisování satorového svazku do kostry je u koster z hliníku prováděno nahřáním kostry a jejím následným usazením na sator, kdy satorový svazek je umístěn na přípravku ve vertikální poloze a na něj se volně vsadí kostra a právě díky přípravku je zabezpečena správná vzdálenost mezi čelem kostry a čelem satorového svazku. [1] [2]

Pro výrobu satorových svazků se používají izolované izotropní plechy s přísadou křemíku, dříve také nazývané dynamoplechy. Dynamoplechy zajišťují snížení ztrát, které způsobují vířivé proudy a zároveň je jednou z jeho vlastností vysoká magnetická vodivost. Jedním z výrobců těchto plechů je U. S. Steel Košice. Satorové svazky se vyrábějí na stříhacích rychlolistech, kdy po vyhlisování jsou plechy spojeny do satorového svazku. Pro spojení plechů do satorového svazku nebo paketu je používáno několik následujících technologických postupů, kdy první metodou je nýtování. U tohoto způsobu spojení jsou vyhotoveny otvory v plechu v místech, kde nemůže dojít k přerušení magnetického toku a zároveň jsou průměry nýtů voleny také s ohledem na minimalizování narušení cest magnetického toku ve satorovém svazku. Velmi podobná technologie k technologii nýtování je sponkování satorového svazku, kdy materiálem pro spojení je spona, která se zpravidla umísťuje na vnější část satoru z důvodu, aby nedocházelo k narušování magnetického toku ve satorovém svazku. Tohoto způsobu se využívá ve společnosti Siemens pro spojování

statorových plechů tzv. paketováním. Dalším možným vhodným způsobem spojování statorových plechů je svařování v ochranné atmosféře, kdy u tohoto druhu spojování jsou výsledky velmi závislé na druhu plechu a druhu izolace plechů. V poslední době se ovšem začíná prosazovat i technologie paketování v nástroji, kdy dojde k vystřížení příslušného tvaru a v závěru zdvihu dojde k zalisování vystříženého plechu speciálním zámkem do již předem vystříženého plechu, který byl přidržen po vyhlisování na svém původním místě. V některých případech ovšem nastává problém, kdy není možné zabránit narušení cest magnetického toku. Proto se používá spojování plechů lepením, kdy nám lepidlo zároveň tvoří izolaci mezi plechy. [1] [2] [3]



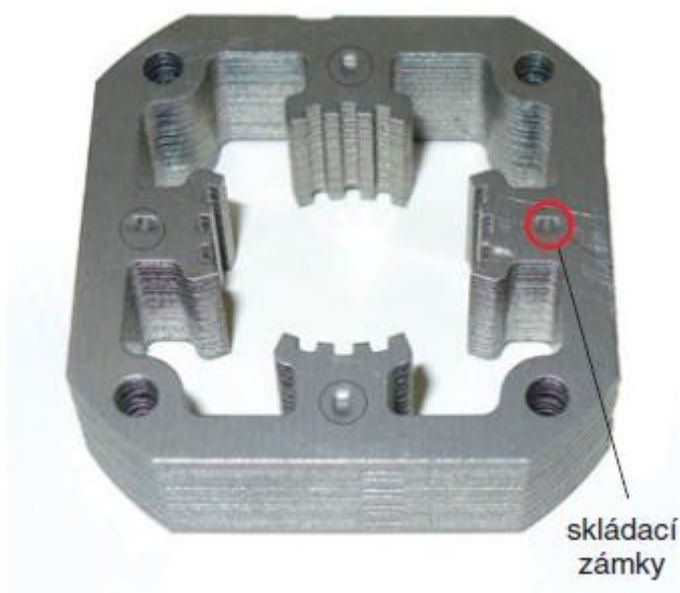
Obr. 2 Spojení statorového svazku nýty [3]



Obr. 3 Spojení statorového svazku sponami [3]



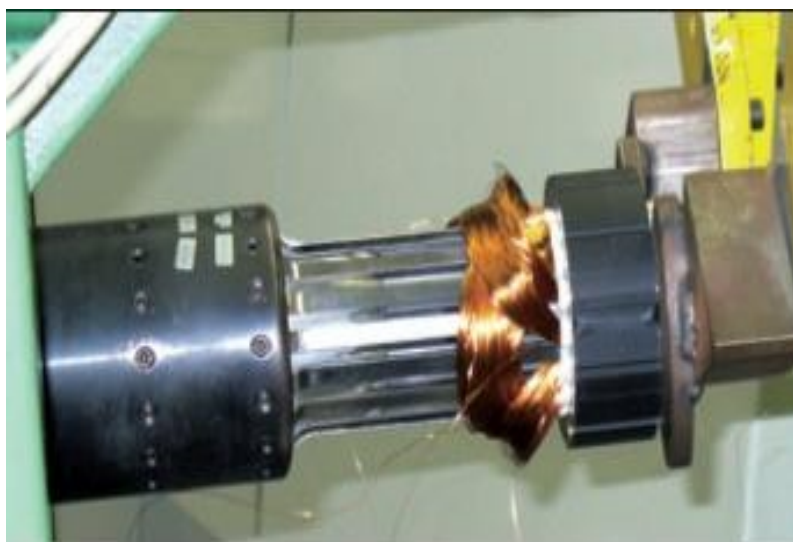
Obr. 4 Spojení statorového svazku svařováním [3]



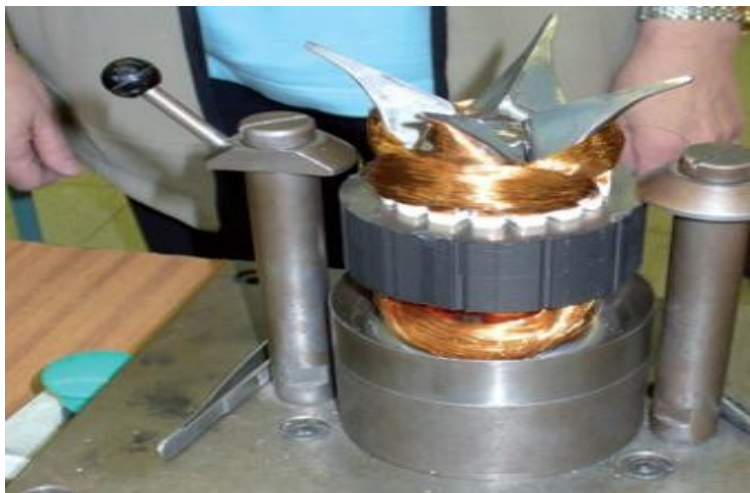
Obr. 5 Spojení statorového svazku paketováním v nástroji [3]

Po zhotovení statorových svazků je do svazků vkládáno vinutí, což je navinutý měděný drát. Proud, který protéká vinutím, vytváří točivé magnetické pole, které indukuje magnetické pole v rotoru, a tím dochází k přeměně elektrické energie v mechanickou. Pro vkládání vinutí do statorového svazku se využívá několika způsobů, kdy nejjednodušší způsob představuje ruční vkládání. Způsob ručního vkládání vinutí má jednu nevýhodu, kterou je nižší produktivita práce. Proto tohoto způsobu spíše využíváme pro malé série elektromotorů nebo pro výrobu prototypů, kde by byla příliš nákladná mechanizace pro vtahování svazků. Dalším

nejrozšířenějším způsobem vkládání vinutí do svazků je vtahování. Pro vtahování se používají vtahovací zařízení vybavené speciálními zatahovacími přípravky, kdy je vinutí nejprve předem navinuto na šablony a poté dojde ke vtažení vinutí do drážek statorového svazku, který je již opatřen drážkovou izolací. Po provedení výše uvedených operací, jako je vtažení vinutí do statorového svazku, je čelo vinutí několikanásobně tvarováno. Po vytvarování čela do potřebného tvaru následuje operace vzájemného propojení cívek včetně opatření přívodních vodičů, další operace je obšívání čel tkanicí, které je prováděno z důvodu mechanického zpevnění vinutí před posledním konečným tvarováním. Konečné tvarování vinutí zajišťuje dosažení předepsaných rozměrů a zároveň zajistí dodržení povrchové a vzdušné vzdálenosti vinutí od kostry a ložiskových štítů. Po provedení všech těchto výše uvedených operací je nutná kontrola samotného provedení vinutí, jako je jeho ohmický odpor. Poslední a velmi důležitou operací, která je prováděna na vinutí statorového svazku, je impregnace, která se provádí především pro zlepšení izolačních vlastností a jeho mechanické zpevnění a zároveň jako ochrana proti nepříznivým vlivům. Podstata samotné impregnace spočívá ve vpravení impregnačního laku nebo pryskyřice do mezer, které jsou mezi závity uvnitř cívek vinutí. Impregnaci na statorový svazek elektromotoru můžeme nanášet několika způsoby, těmi jsou například zakapání, namočení statorových svazků do impregnační lázně a další metodou je metoda nanášení impregnačního laku ve vakuu. Způsob nanášení laku ve vakuu se využívá pro aplikace motorů do velmi náročných podmínek.[1] [2] [3]



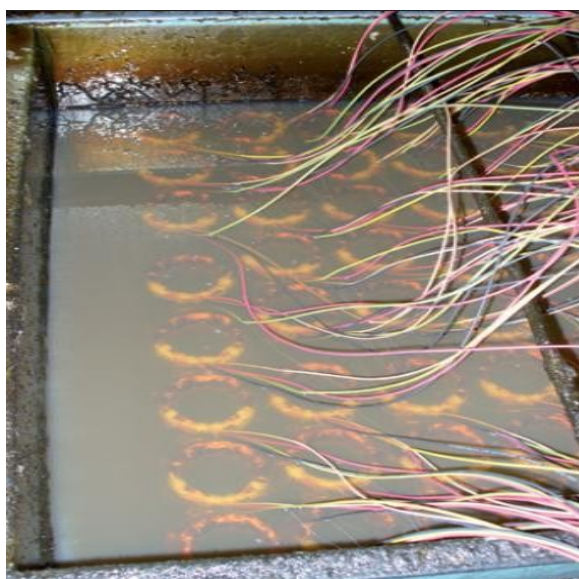
Obr. 6 vtahování vinutí do statorového svazku [3]



Obr. 7 Rovnání čela statorového svazku [3]

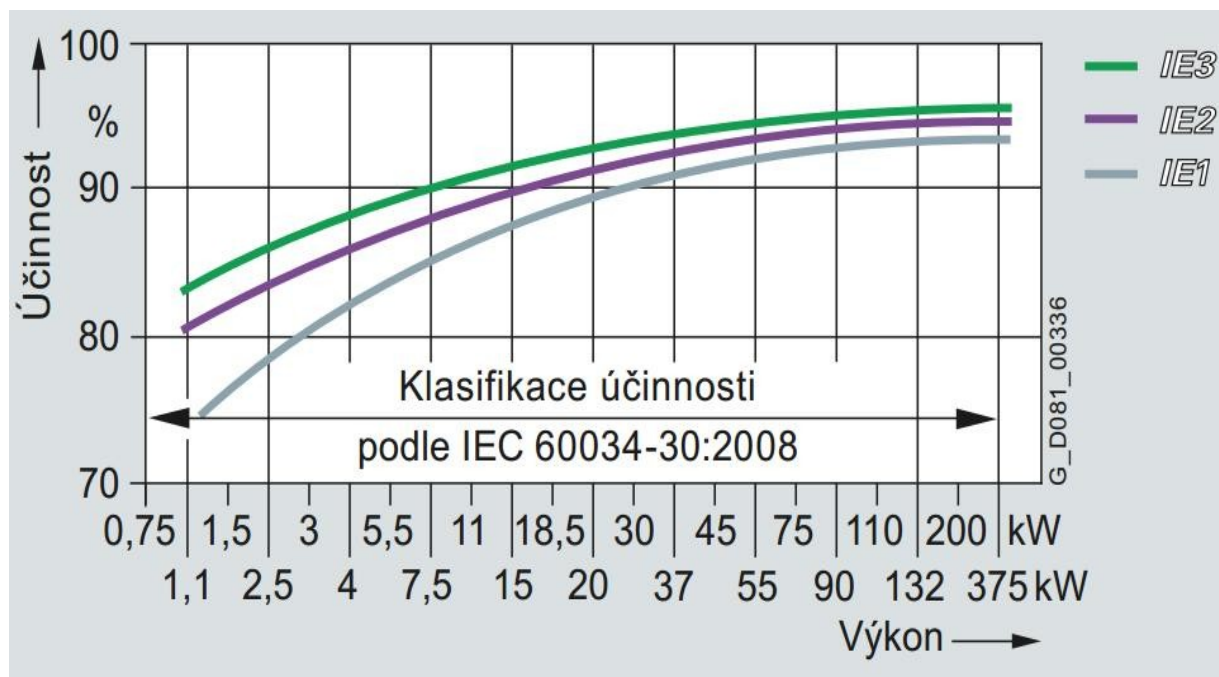


Obr. 8 Obšívání vinutí statorového svazku a obšité statorové svazky [3]

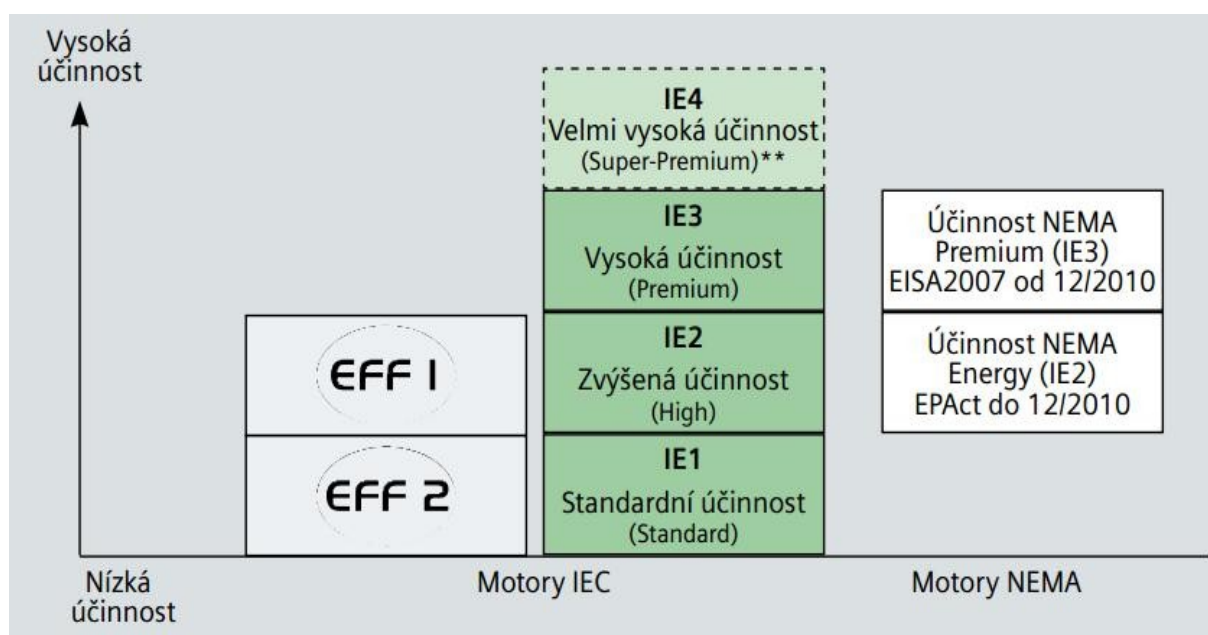


Obr. 9 Máčení a sušení statorového svazku [3]

Rotor elektromotoru je součást, která je umístěna v ose elektromotoru. Rotor u elektromotorů s kotvou nakrátko představuje svazek vzájemně izolovaných plechů s rotorovými drážkami, ve kterých je tlakovým litím vytvořena tzv. klec nakrátko. Klec nakrátko může být zhotovena z elektrovedivého hliníku, který má čistotu 99,5%, nebo popřípadě ze slitiny siluminu s již předdefinovanou elektrickou vodivostí. V případě měděné klece v kombinaci z hliníkovým zkratovým kruhem hovoříme o tzv. hybridním rotoru. Měděné rotory jsou v porovnání s hliníkovými těžší, jelikož měď patří mezi těžké kovy, její měrná hustota je $8,9 \text{ kg/dm}^3$, hliník patří mezi kovy lehké, kdy jeho měrná hustota je $2,7 \text{ kg/dm}^3$. Jednou z výhod mědi je to, že je velmi vodivá a v porovnání s hliníkem případně jeho slitinami dosahuje až o 35% lepší vodivost. Výrobní výhodou hliníku oproti mědi je teplota tavení hliníku 660°C , kdežto mědi 1083°C . Z tohoto důvodu byla po pár letech vyvinuta forma, která je vhodná pro odlévání mědi, ve které je možné dosáhnout výrazně vyšších teplot při současném zachování vysoké životnosti používané formy. Výhoda měděných rotorů v porovnání s hliníkovými spočívá v tom, že dochází k úspoře elektrické energie, což je vzhledem k cenám elektrické energie odběrateli požadováno i za cenu vyšších vstupních nákladů při pořízení elektromotoru. Elektromotory osazené měděným rotorem dosahují velmi vysoké účinnosti. V současné době definuje norma ČSN EN 60034 – 30 hladiny účinnosti elektromotorů a zařazuje je do účinnostních tříd IE1 – IE3, kde IE1 je účinnost standardní (využívá se zde většinou rotor odstříknutý z hliníku), IE 2 zvýšená účinnost (rotory již většinou měděné nebo hybridní) a IE3 velmi vysoká účinnost (rotory jsou hybridní nebo měděné). Pro správnou funkci rotoru v samotném elektromotoru je nutné jeho vyvážení. V případě, že je rotor špatně vyvážen, dochází k jeho vibracím v elektromotoru, které jsou nežádoucí především pro trvanlivost ložisek a hlučnost. [1] [2] [3] [4]



Obr. 10 Účinnost motorů IE1-IE3 [4]



Obr. 11 Mezní hodnota účinnosti v jednotlivých třídách IE závisí na výkonu, značení EFF1 a EFF 2 se již v dnešní době nepoužívá [4]

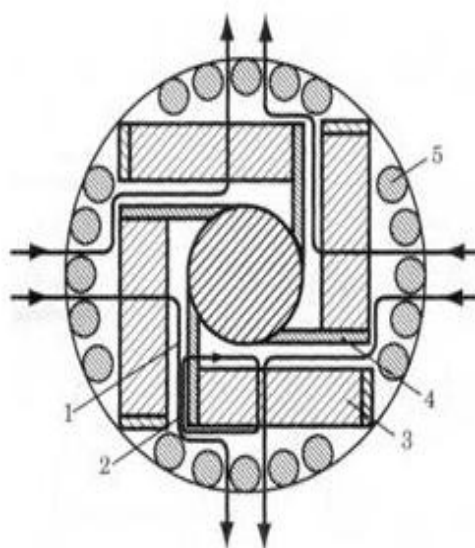


Obr. 12 Hliníkový a měděný rotor [5]

1.1 Rozdíl mezi synchronními a asynchronními elektromotory

Synchronní elektromotor je ve své podstatě elektromotor asynchronní. Rozdíl mezi oběma druhy elektromotorů spočívá ve vyčnívajícím magnetickém pólu u elektromotorů synchronních, které tvoří permanentní magnet především u menších elektromotorů nebo elektromagnet u větších. Rotor je zpravidla vyroben z mědi, hliníku a mosazných tyčí, které jsou umístěny v jeho drážkách a jsou na obou koncích vodivých kroužků propojeny dohromady. Toto pevné jádro rotoru je integrováno do elektrických ocelových lamel. Počet drážek rotoru musí být rovněž násobkem statorových drážek, aby se zabránilo vzájemnému propojení magnetického pole rotoru a statoru při spuštění motoru. Rotor u synchronního elektromotoru má zpravidla dva nebo více pólových párů a je možné jej použít pro motory nízkootáčkové. Jistou nevýhodou u synchronního elektromotoru představuje fakt, že po jeho připojení do elektrické sítě nedojde k jeho roztočení, což je způsobeno setrvačností rotoru a vysokou rychlostí točivého magnetického pole. Z tohoto důvodu musejí rotory synchronních elektromotorů dostávat vnější pomoc, aby byl rotor schopen získat stejné otáčky jako vnější pole. Synchronní motory, které mají vlastní spouštění, jsou zpravidla konstruovány pro pohon z frekvenčních měničů. Frekvenční měniče, které jsou konstruovány pro synchronní motory, musí mít vlastní software určený pro jejich provoz. V praxi existují i motory, které mohou být spouštěny pomocí startovacích vinutí, což způsobuje, že motor funguje, jako by měl zkratován klecový rotor. Synchronní motory fungují s konstantními otáčkami bez ohledu na jejich zatížení, ale naopak nezvládnou vyšší zatížení, než které jim dovolí jejich startovní výkon, který je mezi rotorem a magnetickým polem. V současné době

jsou synchronní elektromotory používány především v elektromobilech, popřípadě v hybridních automobilech, které kombinují spalovací motor společně s motorem elektrickým. [6] [7]



Synchronní motor s permanentními magnety

1. Účinný mag. tok
2. Uzatvřený mag. tok
3. Permanentní magnety
4. Distanční deska (nemagnetická)
5. Startovací klec

Obr. 13 Schéma indukčního elektromotoru [6]



Obr. 14 Synchronní elektromotor s permanentními magnety [8]

1.2 Společnost Siemens s.r.o., Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice

Společnost Siemens s.r.o., o.z. Elektromotory Mohelnice, patřící do mezinárodního koncernu Siemens AG se sídlem v Berlíně, je největším výrobcem nízkonapěťových asynchronních elektromotorů v Evropě. Koncern Siemens AG je zároveň největší výrobce elektroniky na světě, který po celém světě zaměstnává přibližně 472 000 lidí a v samotném mohelnickém závodě na výrobu elektromotorů okolo 2000 pracovníků.[9]

Mohelnický závod společnosti Siemens v letošním roce 2014 oslaví již 110 let od počátku výroby elektromotorů v Mohelnici. Firma, která před 110 lety začínala pod jménem Ludwig Doczekal & Comp. se zabývá v současné době výrobou nízkonapěťových asynchronních elektromotorů v osových výškách 63 mm až 200 mm, které je možné pro koncové zákazníky objednávat ve standardním provedení či ve speciálních zákaznických specifikacích, které si zvolí samotný zákazník pro své specifické potřeby. Mohelnický závod na výrobu elektromotorů je v plném vlastnictví Siemens AG od roku 1994, kdy dne 1. 6. byla schválena vládou ČR privatizace motorářských aktivit MEZ Mohelnice s.p. formou přímého prodeje majetku společnosti Siemens AG. Ovšem i v minulosti již byl mohelnický závod ve vlastnictví společnosti Siemens, a to od roku 1926, kdy ke dni 21. 12. vznikla fúzí Elektrotechnické a strojírenské a.s. v Mohelnici a Siemens & Co. v Praze společnost Siemens Elektrotechnika, která následně byla po II. světové válce znárodněna a převedena pod správu Siemens-Schuckertových závodů, čímž vznikla značka MEZ, která fungovala až do roku 1994. Ještě v současné době jsou pod tímto názvem na určitých trzích prodávány elektromotory společnosti Siemens.[9]



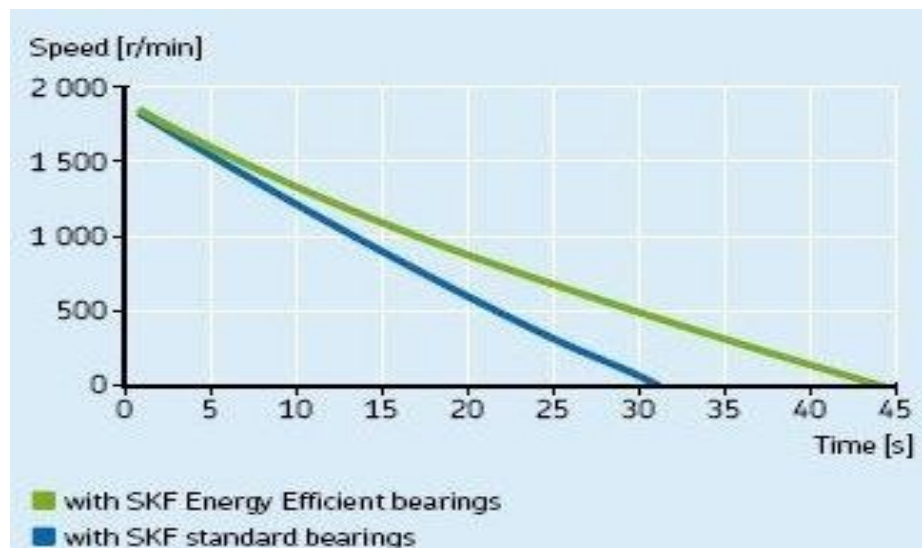
Obr. 15 Siemens elektromotory Mohelnice [9]



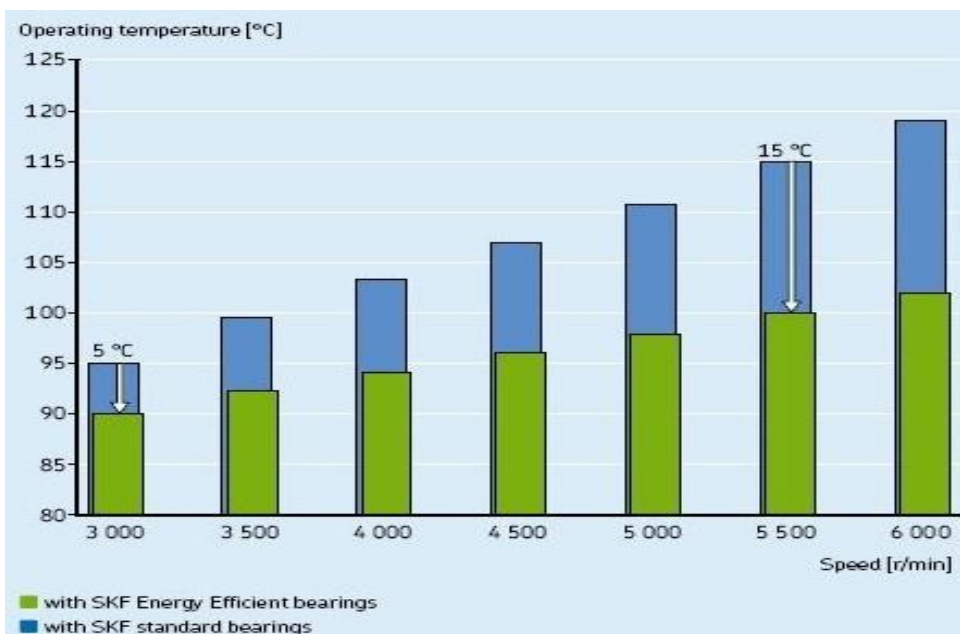
1.3 Ložiska SKF E2

SKF je švédská společnost zabývající se výrobou ložisek a jiných výrobků v technické oblasti. Zaměstnává po celém světě ve svých závodech okolo 44000 zaměstnanců. V posledních letech představila energeticky účinná ložiska řady E2, u kterých se v této práci budeme snažit prokázat jejich vhodnost při nasazení v elektromotorech společnosti Siemens. Budeme se snažit prokázat především velikost úspor, které společnost SKF deklaruje. Ložiska řady SKF E2 jsou určena především pro zvýšení efektivity strojů a úsporu energií a to za pomoci zlepšené vnitřní geometrie v porovnání se standardními ložisky, krytváním ložisek na obou stranách z důvodu omezení vlivů, které by mohly zvyšovat tření v samotném ložisku, novou konstrukcí klece a speciálního maziva, které bylo vyvinuto pro tento nový typ ložisek. Ložisko typu SKF E2.6306-2Z/C3 vykazuje v průměru o 50% nižší tření ve srovnání se standardními kuličkovými ložisky SKF s kryty. Měření tření byla prováděna za různých provozních podmínek. Provozní teplota ložisek SKF E2 a ložisek standardního typu je dle provozních podmínek o 5 - 15°C nižší, což je pro nás velmi žádoucí z důvodu vyšší životnosti ložiska a zároveň zvýšené provozní spolehlivosti ložiska v porovnání se standardními typy ložisek. Provozní trvanlivost ložiska závisí na zatížení. Pokud na uložení ložiska působí malé nebo normální zatížení, nedochází k takové únavě materiálu jako v případech, kdy působí na uložení velká zatížení. Ovšem omezujícím faktorem, který určuje celkovou životnost ložiska s kryty, je životnost maziva. Životnost plastického maziva závisí především na provozní teplotě ložiska, otáčkách a zatížení. Životnost plastického maziva se dá definovat jako doba, při které bude na jejím konci 90% stejných ložisek stále spolehlivě mazáno. V porovnání se standardními ložisky SKF mohou ložiska SKF E2 dosáhnout více než dvojnásobné střední doby mezi poruchami, a to především vlivem jeho nižší teploty v samotném ložisku a zároveň v mazivu s velmi nízkým třením. Mazivo vyplňuje přibližně 25 – 35% volného prostoru v ložisku. Mazivo, které je uvnitř ložiska, je doživotní, tzn., že jeho životnost trvá po celou dobu technického života ložiska. Pro zlepšení technického života by neměla být ložiska vystavována teplotám vyšším než 80°C, jelikož by mohlo dojít k výraznému zkrácení života ložiska. Ložiska SKF E2 jsou standardně opatřena na obou stranách kryty, které jsou zhotoveny z ocelového plechu, a zároveň jsou opatřena otevřenou klecí, která je vedena kuličkami. Klec je zhotovena z kompozitního polymeru zesíleného skelnými vlákny, který je zároveň odolný vysokým teplotám. Právě klec představuje jednu z nejdůležitějších předností energeticky účinných ložisek. Konstrukční změny, které nastaly v případě klece ložiska, přinesly menší deformace klece ložiska za jeho provozu. Aplikace energeticky účinných

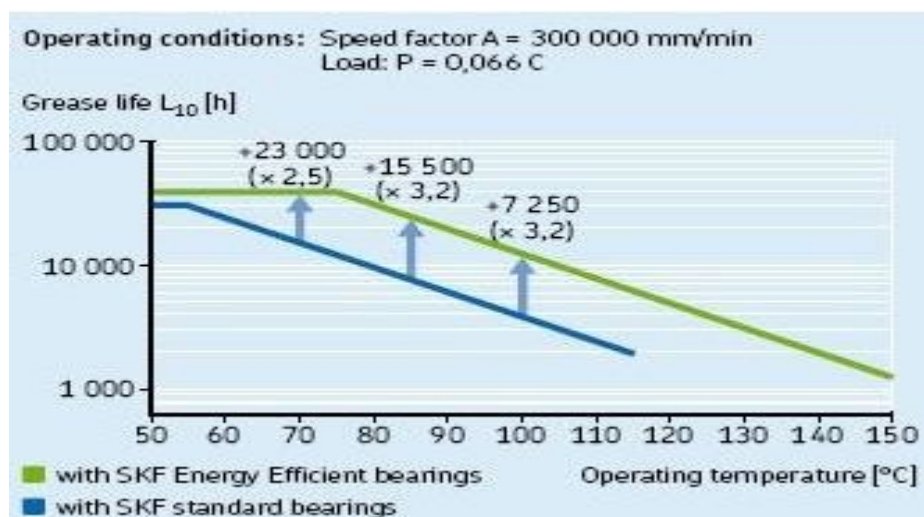
ložisek je především pro nižší až středně velká zatížení a vysoké otáčky. Typického uživatele těchto ložisek představují právě elektromotory, čerpadla, dopravníky. Tato ložiska byla navržena právě pro možnosti těchto aplikací. [10]



Obr. 16 Doba doběhu elektromotoru po přerušení přívodu elektrické energie, kdy doba doběhu s ložisky SKF E2 je o 50% delší [10]



Obr. 17 Výsledek testů provozní teploty při různých rychlostech [10]



Obr. 18 Porovnání životnosti plastického maziva v ložisku SKF E2 a standardních kuličkových ložiscích SKF [10]



Obr. 19 Porovnání klece standardního ložiska SKF a klece ložiska E2 při otáčkách $8\,000\text{ min}^{-1}$ ukazuje sníženou deformaci [10]

1.4 Mazání valivých ložisek

Mazání valivých ložisek má za hlavní účel snížení tření a s tím spojeného opotřebení ložisek. V ložisku, kde dochází ke kontaktu mezi kroužky a valivými segmenty, nastává valení a prokluz, který je odvislý od druhu ložiska, jeho zatížení a na druhu mazání. U valivých ložisek dochází za provozu k elastohydrodynamickému mazání, které je charakterizováno velmi výrazným zvýšením tlaku mazacího filmu uvnitř kontaktní oblasti

valivého ložiska. Mazání v ložiscích má několik hlavních úloh a těmi jsou především snížení tření a následné nežádoucí opotřebení. V případě, kdy se jedná o snížení tření a opotřebení, zabránujeme přímému kontaktu kovu na kov mezi valivými segmenty, ložiskovou klecí a zároveň ložiskovými kroužky za pomoci mazacího filmu, který je mezi těmito plochami a snižuje nežádoucí tření, které nastává v kontaktních oblastech. Další úlohou mazání v ložiscích je prodloužení únavové životnosti, kdy samotná únavová životnost ložiska je odvislá především od viskozity použitého maziva a jeho tloušťky mezi kontaktními plochami v ložisku. Další z úloh mazání v ložiscích je odvod tepla, kdy cirkulace oleje může odvádět přebytečné nežádoucí teplo, které vzniklo třením ploch, a tím chránit nejen ložisko, ale i olej před jeho degradací. Při vzniku tepla v ložisku dochází ke zkracování celkového technického života použitého ložiska. Ovšem v případech, že jsou některá ložiska velmi málo zatěžována nebo pracují při velmi malých rychlostech, nevyžadují žádné mazivo nebo případně velmi malé množství maziva. V případech, že jsou ložiska za chodu mazána proudem olejem, se jedná o chlazení ložiska, aby nedocházelo k přehřívání a následně místním trvalým deformacím v ložisku. Nesprávné mazání ložiska znamená, že až v 36% jeho aplikací dojde k jeho následnému selhání a tím i konci jeho technického života, kdy je nutno přistoupit k jeho v mnoha případech nákladné výměně. Ložiska jsou mazána plastickým mazivem, které může být jak doživotní, tzn. že po celou dobu životnosti ložiska si při jeho správném užívání zanechává mazivo své původní vlastnosti, což je případ ložisek SKF E2, u kterých výrobce společnost SKF říká, že mazivo je doživotní. Ovšem u jiných ložisek nemůžeme brát náplň ložiska jako doživotní, jelikož mazivo postupem času degraduje. Na rychlost degradace maziva má vliv několik faktorů, jsou to frekvence otáček ložiska, prostředí, ve kterém jsou ložiska používána. Z tohoto důvodu někteří výrobci ložisek určují druh maziva, který musí být v ložisku užíván při určitých klimatických podmínkách. Maziva, která jsou určena pro ložiska, jsou založena především na minerální bázi, kdy jsou použita zahušťovadla, kupříkladu kovová mýdla mastných kyselin. Ložisko může být zaplněno maximálně ze 60 % mazivem z důvodu, že při příliš velkém objemu maziva roste u ložiska třecí moment, čímž vznikají velké energetické ztráty, které jsou při provozu strojů pro nás velmi nežádoucí. U ložisek SKF E2 je zaplnění mazivem na úrovni 25 – 35 % jeho volného prostoru, což je výhodné z důvodu eliminace tření.[11] [12] [13]

Tab. 1 Rozdíly mezi mazáním valivých ložisek olejem a plastickým mazivem [13]

Mazání ložisek plastickým mazivem	Mazání ložisek olejem
Nízké teploty	Vysoké teploty a zároveň velmi nízké teploty
Nízké frekvence otáčení	Vysoké frekvence otáčení
Ochrana ložiska proti vnikání vnějších nečistot (kryty, těsnění)	Nutnost těsnění proti únikům oleje
Možnost dlouhodobého bezúdržbového provozu	Ložiska při mazání olejem jsou mazána z centrálního zdroje, který také maže ostatní součásti stroje
Slabé chlazení – špatný odvod tepla	Dobré chlazení – odvod tepla olejem
Nulová možnost odstranění nečistot z maziva	Velmi snadné odstranění nečistot z oleje za pomoci filtrů

Vlastnosti plastických maziv pro valivá ložiska				
Druh plastického maziva		Vlastnosti		
Zahušňovací prostředek	Základní olej	Teplotní rozsah použití [°C]	Odolnost vůči vodě	Použití
litiové mýdlo	minerální	-20 až 130	odolné	víceúčelové mazivo
vápenaté mýdlo	minerální	-20 až 50	velmi odolné	dobrý těsnicí účinek vůči vodě
sodné mýdlo	minerální	-20 až 100	neodolné	emulguje s vodou
hlinité mýdlo	minerální	-20 až 70	odolné	dobrý těsnicí účinek vůči vodě
komplexní litiové mýdlo	minerální	-20 až 150	odolné	víceúčelové mazivo
komplexní vápenaté mýdlo	minerální	-30 až 130	velmi odolné	víceúčelové mazivo vhodné pro vyšší teploty a zatížení
komplexní sodné mýdlo	minerální	-20 až 130	odolné	vhodné pro vyšší teploty a zatížení
komplexní hlinité mýdlo	minerální	-20 až 150	odolné	vhodné pro vyšší teploty a zatížení
komplexní barnaté mýdlo	minerální	-30 až 140	odolné	vhodné pro vyšší teploty a zatížení
bentonit	minerální	-20 až 150	odolné	vhodné pro vysoké teploty při nízké frekvenci otáčení
polymočovina	minerální	-20 až 160	odolné	vhodné pro vysoké teploty při střední frekvenci otáčení
litiové mýdlo	silikonový	-40 až 170	velmi odolné	vhodné pro široký teplotní rozsah při střední frekvenci otáčení
komplexní barnaté mýdlo	esterový	-60 až 140	odolné	vhodné pro vyšší teploty a vyšší frekvence otáčení

Obr. 20 Vlastnosti plastických maziv pro valivá ložiska [13]



1.5 Vady valivých ložisek

Stejně jako ostatní strojní součásti i ložiska jsou během svého technického života vystavována různým vnějším vlivům, kterými mohou být například vlivy tepelného charakteru, napěťového a chemického charakteru, které způsobují v ložisku samotném degradaci jeho jednotlivých částí. Degradace jsou zpravidla nevratného charakteru. V krajních případech mohou degradace v ložisku vést až ke konci jeho technického života, což je velmi nežádoucí z mnoha důvodů. Při styku částí ložiska, jako jsou vnější nebo vnitřní kroužek, klec ložiska a kuličky, dochází ke styku kov na kov, čímž dochází k porušování absorpčních a oxidačních vrstev, což má za následek tvorbu mikrospojů. Tyto mikrospoje jsou při následném relativním pohybu ložiska rozrušovány, čímž dochází v samotném ložisku k oddělování kovových částic. Četnost oddělování kovových částic závisí na mnoha rozličných faktorech, kdy nejvýznamnějšími z nich jsou druhy a vlastnosti používaných materiálů pro výrobu ložisek, přítomnost maziva, působení sil na ložisko, kdy bereme v úvahu velikost zatěžující síly a četnost změn zatěžujících sil. [11] [14]

Jen velmi malé procento používaných ložisek ukončí předčasně svůj technický život. Naopak velké procento ložisek přežije technický život stroje, ve kterém jsou používána. Všechny důvody poruch ložisek mají za následek specifické poškození, které na ložisku zanechává stopy, právě díky kterým můžeme rozeznat druh poškození a následně i příčinu vzniku daného poškození. Přibližně u 30 % ložisek je poškození ložiska způsobeno jeho stářím, kdy mluvíme především o únavě jeho povrchových ploch. Dalším druhem poškození je nedostatečné mazání ložiska, které nastává u 36 % ložisek. V dalších případech, přibližně 16 %, nastává konec technického života ložiska z důvodu jeho nesprávné montáže a uložení. Konec technického života ložisek může také nastat z důvodů špatných provozních podmínek. Výše uvedené případy ovšem nemusí nastávat dle uvedených procentuelních hodnot, ale podle toho, v jaké průmyslové aplikaci jsou ložiska používána. Vlastnosti materiálů, které se na ložiska používají, jsou ve velké míře ovlivňovány technologiemi, kterými jsou vyráběny. Vady na ložisku způsobené během výroby můžeme označit pojmem výrobní degradace ložiska. Vady na ložisku způsobené během provozu v zařízeních označujeme jako provozní degradaci ložiska. [11] [14]



Poškození ložisek, které vzniklo před jejich použitím: [11] [14]

- Vrypy nebo také poškrábání ložiska jsou vady, které mohou být na samotném ložisku způsobeny ostrým předmětem, nástrojem, nebo i jiným vnějším činitelem. Mohou vznikat jak při výrobě, montáži tak i při přepravě.
- Překrývání a švy jsou vady na ložisku, které vznikly při jeho výrobě nanesením části materiálu na sebe. Rozdíl mezi ložiskem, které je poškozené a které ne je velmi těžko rozeznatelný. Při tomto druhu poškození vznikají kritické stykové plochy, které mohou vést až ke konci technické života ložiska.
- Poruchy, které byly způsobeny broušením za nevhodných podmínek mohou způsobit vysoké teploty, které působí na materiál ložiska. Tyto teploty mohou dosáhnout teplot popouštění, což je nežádoucí z důvodu, že může dojít ke snížení tvrdosti povrchové vrstvy. Krajní možností je, že může dojít až ke stavu, že povrch ložiska dosáhne tak vysoké teploty, že může dojít až k austenitizaci povrchové vrstvy ložiska. Ovšem jak se brusný kotouč vzdálí, dojde k ochuzení zrna a k znovu zakalení povrchové vrstvy. Nově vzniklou vrstvu na materiálu ložiska nazýváme, opal po broušení.
- Nedokončená místa, porózita, povrchové důlky, vměstky jde o druhy vad, které vznikly již při samotné výrobě. Například vměstky v materiálu jsou podpovrchové vady způsobující, že dochází k odlupování povrchové vrstvy.

Poškození ložisek vznikající za jeho provozu: [11] [14]

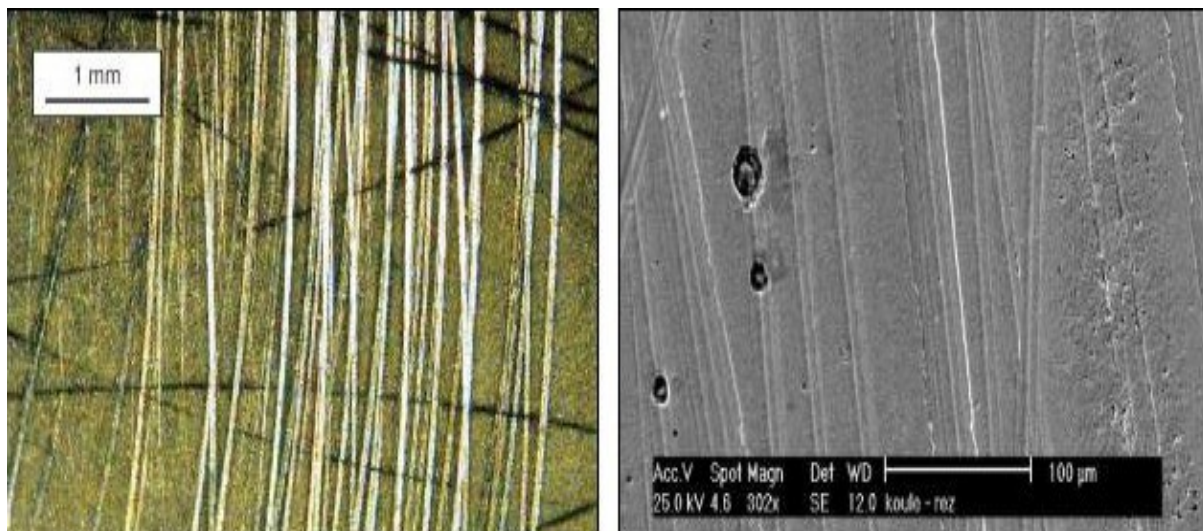
- Pitting – V případě pittingu mluvíme o druhu únavového opotřebení, které vzniká během provozu ložiska a zároveň velmi ovlivňuje životnost samotného ložiska. K pittingu dochází vlivem cyklického namáhání oběžných drah kroužků ložiska a kuliček, kdy ještě nedochází k intenzitě, která přesahuje mez kluzu materiálu ložiska. První známky pittingu vznikají v povrchové vrstvě materiálu ložiska a jsou, zpravidla s jeho povrchem rovnoběžné. Dále dochází k rozvoji pittingu, který se můžou větvit a spojovat (zpravidla po hranici zrn) až dojde ke konečné fázi a to vylamování zrn. Vznik samotného pittingu je vcelku pomalý ale jsou pro něj charakteristické vznikající vibrace a zvyšování samotné hlučnosti ložiska. Velmi častým projevem pittingu v materiálu ložiska je tvoření důlků s charakteristickým lomem, kdy samotné důlky jsou okrouhlého tvaru. V případě ložiskových materiálů o vysoké tvrdosti je tvar

pittingu hranatý, popřípadě i protáhlý. Na vznik samotného pittingu má významný vliv mazivo ložiska, které při kontaktním tlaku vniká do povrchových trhlin a zároveň při dalším pohybu součástí je v nich uzavíráno, což přispívá ke vzniku dalších a dalších trhlin, ze kterých vznikají výše zmíněné důlky. K zamezení pittingu je nutný správný výběr maziva pro určité ložisko a jeho následnou aplikaci.



Obr. 21 Pitting [15]

- Vydírání – v případě vydírání se jedná o druh velmi vážného opotřebení ložiska, ke kterému dochází v místě styku kuliček ložiska s vnitřním a vnějším kroužkem. Při vydírání ložiska dochází i k prokluzu. Zadírávání ložiska je možné odstranit vylepšením samotného pracovního prostředí ložiska, a to například vhodným mazivem.
- Mechanické opotřebení – mechanickým opotřebením je myšleno takové opotřebení, které je mírného charakteru a způsobuje v ložisku oddělování malých částic z funkčních ploch, kdy zároveň nedochází k přemísťování materiálu z jednoho místa na druhé. Oddělování materiálu v ložisku je způsobováno přímým stykem pevných těles. To je výsledkem toho, že výstupky nerovností pronikají do jiných součástí ložiska, se kterými jsou ve vzájemném kontaktu a zároveň částice, které vznikly opotřebením nebo i nečistoty, jsou zachycovány mezi plochami, které jsou ve vzájemném styku, jsou do nich vtlačovány a někdy se i výstupky mohou spojit, čímž dojde k tvorbě mikrosvarů, které jsou následně pohybem ložiska vytrhávány a dochází k tvorbě kráterů.



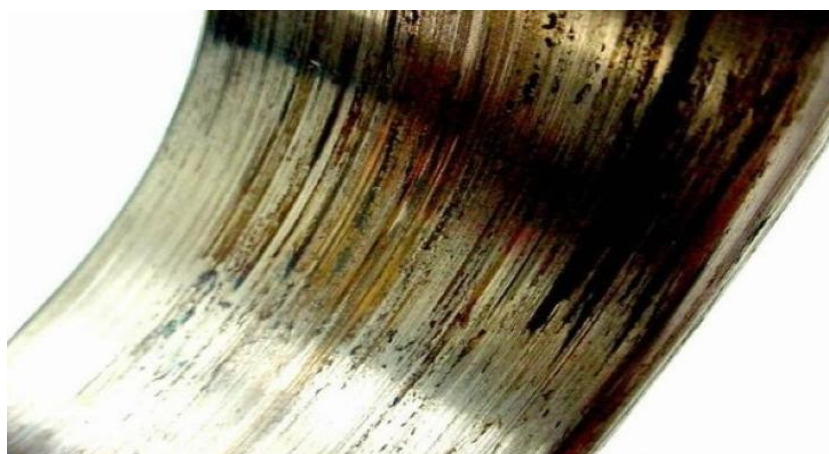
Obr. 22 Rýhy a krátery na povrchu ložiska [16]

- Plošné poškození – jde o druh poškození, které nastává v případě, že rychlost valení vysoce převyšuje rychlost kluzu. Tento druh opotřebení se neprojevuje přítomností mechanického opotřebení a zároveň ani žádnou plastickou deformací. Pouze na valivých plochách ložiska dochází k plošným nebo místním projevům určité únavy, jako může být například vznik trhlin nebo i případně odlupování povrchu.
- Teplotní poškození – toto poškození ložiska vzniká z důvodu nedostatečného nebo nulového chlazení ložiska, popřípadě zvýšením rychlosti či zatížení. Teplotní poškození ložiska se projevuje vznikem zbarvení, snížením jeho tvrdosti, plastickou deformací a může dojít až k samotnému zadření ložiska.
- Fretting – jde o druh vibračního poškození, které je specifické oddělováním částic materiálu v místech, kde dochází ke kmitavým posuvům funkčních ploch zároveň při jejich zatížení normální silou. Vibračního poškození se vyskytuje především na vnějším a vnitřním kroužku ložiska. Vibračním opotřebením se mohou poškozovat i velmi tvrdé materiály. Na vibrační opotřebení působí řada faktorů, kterými jsou amplituda pohybu, frekvence pohybu, měrný tlak ve styku součástí a vlastnosti materiálu použitého pro výrobu ložisek.



Obr. 23 Vibrační opotřebení ložiska [14]

- Poškození ložisek abrazivními částicemi popisuje norma ČSN 01 5085, kdy je abrazivní opotřebení ložiska hodnoceno jako jeho nevratná změna, která je způsobena vzájemným působením funkčních ploch ložiska a abrazivního média, kterým může být mazivo s obsaženými nečistotami, které vznikly při montáži ložiska, jeho provozu a případně mohou být obsaženy již v samotném mazivu. Kvůli přítomnosti abrazivních částic dochází k velmi rychlému opotřebení ložiska, které se projevuje rýhami a poruchami funkčních ploch.



Obr. 24 Abrazivní poškození ložiska [14]

- Electrical corrosion – neboli elektrická koroze vzniká v ložisku při průchodu elektrického proudu, je-li jeho hodnota vyšší než 0,5V. Při této hodnotě elektrického proudu dohází v ložisku k jiskření, které prochází mazivem. Jiskření v ložisku způsobuje krátery a také někdy může dojít k většímu odtavení materiálu.



Obr. 25 Electrical corrosion [17]

1.6 Montáž ložisek

Nevhodné montážní postupy jsou až v 16 % případů příčinou předčasného vyřazení ložiska z provozu z důvodu, že dojde k jeho selhání. [18]

Při správné montáži ložiska nesmí síla, která na ložisko působí, být přenášena na valivé segmenty v ložisku. [11]

Při montáži ložisek používáme tyto způsoby:

- montáž za studena;
- montáž za tepla.

Montáž ložisek za studena je prováděna především lisováním, které je možné realizovat především u ložisek menších průměru, a to do 80 mm. Jednou z dalších možností montáže ložisek za studena je užití tzv. hydraulické matice. Při lisování za studena jsou na vnitřní kroužek ložiska vyvíjeny velké síly, které mohou způsobit překročení statické únosnosti ložiska, čímž může vzniknout poškození valivé dráhy ložiska, které je nežádoucí z důvodu, že ložisko je již následně pro další aplikace nepoužitelné. Proto z těchto výše popsanych důvodů

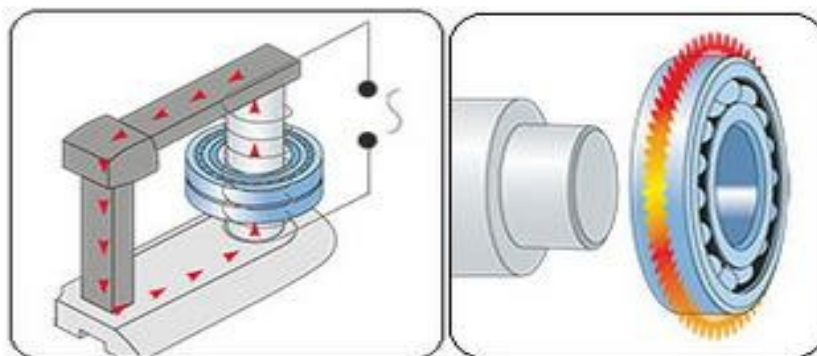


musíme při lisování ložiska působit na jeho vnitřní kroužek a ne jen na určité jeho části, což platí i při demontáži, pokud nechceme ložisko a volný konec hřídele poškodit. Demontáž ložiska lisováním za studena provádíme především z důvodu jeho poškození a potřebou nahradit jiným bezvadným. Pro demontáž ložiska za studena můžeme využít i jiných způsobů, kterými mohou být například stahováky, montážní pouzdra, [11] [18]

Montáž velkých ložisek vyžaduje velké lisovací síly, proto z tohoto důvodu je pro nás výhodnější tato ložiska před montáží nahřívát, jelikož tím významně snížíme montážní síly. Při montáži za tepla se ložiska nahřívají na teplotu přibližně 90°C, kdy můžeme využít několika vhodných způsobů pro jejich nahřátí. Při montáži ložiska musí samotné ložisko dosednout vždy na opěrné plochy například na osazení hřídele ložiska a to z důvodu, aby nedošlo ke zkřížení ložiska a tím porušení například hřídele i samotného ložiska. Pokud by došlo k nesprávné montáži ložiska, předešlá činnost může být znehodnocena. Montáž ložisek na hřídel elektromotoru je prováděna především za tepla. Pokud provádíme montáž ložisek za tepla, využíváme několika různých metod, kterými jsou například ohřev na elektrické plotně. V tomto případě jde o termostaticky regulovaný ohřev ložiska. Další možností ohřevu ložiska je indukční ohřev, který představuje moderní a velmi bezpečný způsob ohřevu. Z hlediska provozu indukční ohřev přináší vysokou rychlost ohřevu, čistotu, velmi dobrou regulovatelnost než jiné způsoby ohřevu ložisek. [11] [18]

Přednosti indukčního ohřevu: [19]

- technicky progresivní výkonová elektronika, která umožňuje za pomoci regulace proudu ovládání rychlosti růstu teploty;
- umožňuje nastavení výkonu v několika krocích 50 – 100%;
- nabízí ochranu proti přehřátí;
- automatické demagnetizování zabezpečuje znečištění ložiska částicemi kovu;
- nízká spotřeba elektrické energie;
- tepelná pojistka proti přehřátí zamezuje poškození přístroje.



Obr. 26 Indukční ohřev ložiska [19]



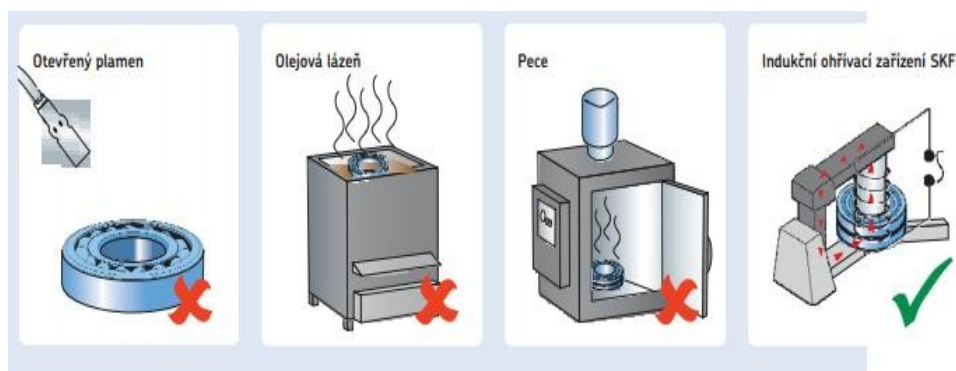
Obr. 27 Některé druhy indukčních ohříváčů od společnosti SKF [19]

Nevhodné způsoby ohřevu ložisek: [19]

- Ohřev ložiska otevřeným plamenem je nevhodný způsob ohřevu, který se vyznačuje především velmi nízkou účinností. Průběh ohřevu je nekontrolovatelný a může způsobit poškození ložiska. Proto je tento způsob nevhodný a neměl by se v technické praxi vůbec používat.
- Ohřev ložisek za pomoci olejové lázně je nevhodný z důvodu dlouhé doby ohřevu olejové lázně na předem požadovanou teplotu, která je poté obtížně regulovatelná, čímž může docházet k obtížné regulaci teploty nahříváného ložiska. Jedním z dalších negativ tohoto způsobu je dále vysoká spotřeba elektrické energie ve srovnání s indukčním ohřevem, čímž se tento způsob stává příliš neefektivním. Dalším důvodem nevhodnosti tohoto způsobu je kontaminace ložiska znečištěným olejem. Ovšem i samotná manipulace s ložiskem je velmi obtížná z důvodu, že ložisko je mastné od oleje, horké a velmi kluzké, což představuje komplikaci pro pracovníka,

který s ložiskem manipuluje. Proto musí být pracovník velmi opatrný a je nucen využívat osobních ochranných prostředků pro zajištění bezpečnosti práce.

- Pece a ohřívací plotny jsou dalším méně vhodným způsobem ohřívání ložisek, jelikož jsou vhodné jen pro větší množství nahřívání menších ložisek. Ohřev velkých ložisek na ohřívacích plotnách není vhodný z důvodu, že není příliš efektivní a je poměrně zdoluhavý a přináší ve srovnání s indukčním ohřevem vyšší spotřebu elektrické energie.



Obr. 28 Nevhodné způsoby ohřevu ložisek [19]

Demontáž ložisek je možné provádět především za pomoci různých stahováků, kterých je k dispozici velké množství, například ručních nebo hydraulických. Demontáž provádíme i nahřátím ložisek za pomoci horkovzdušné pistole. Při nahřátí vnitřního kroužku ložiska dojde k jeho roztažení, čímž je zajištěno jednoduché sejmutí ze součásti a zároveň tímto zabezpečíme nepoškození součásti, které je nežádoucí. Demontáž nahřátím využíváme především u ložisek, která jsou menších průměrů, poněvadž u ložisek větších průměrů bychom nedosáhli optimálního nahřátí a při stahování ložiska by mohlo dojít k poškození součásti, která je pro nás v mnoha případech cennější než již vadné ložisko, které je vyřazeno z provozu. U velkých ložisek využíváme k jejich stažení různé stahováky.[11] [19]



2. Návrh zkoušení elektromotoru

Praktická část diplomová práce se ve svém úvodu zabývala základním mechanickým měřením, které je nutné pro ověření, zdali jsou jednotlivé součásti elektromotoru vyrobeny správně v předem stanovených tolerancích pro nové součásti. Dále proběhlo ověření velikosti vzduchové mezery mezi rotorem a statorem elektromotoru, která musí splňovat předepsanou hodnotu, jinak elektromotor není schopen splňovat dané vlastnosti v oblasti výkonu a účinnosti. Pro ověření správnosti základního mechanického měření byly součásti podrobeny měření na 3D souřadnicovém měřicím přístroji. Po výše uvedeném mechanickém a 3D měření bylo přistoupeno k montáži elektromotoru. Správná montáž elektromotoru a ložisek je důležitým předpokladem správné funkčnosti elektromotoru. Na našem vzorku elektromotoru byly postupně namontovány a zkoušeny dva druhy ložisek, a to energeticky úsporná ložiska SKF E2 a standardně dodávaná ložiska do elektromotorů od společnosti ORS. Při montáži elektromotoru byly zároveň do něj umístěny termočlánky na celkem jedenácti místech, abychom mohli změřit teplotu elektromotoru při různých režimech běhu. Po provedení montáže byly provedeny vlastní zkoušky. První zkouškou byla zkouška měření mohutností vibrací, která byla provedena dle normy ČSN EN 60034-14. Měření mohutnosti vibrací bylo provedeno na celkem pěti předem daných místech elektromotoru. Zkouška byla prováděna z důvodu ověření vlastností elektromotoru, které jsou dané normou, a zároveň také z důvodu ověření, zdali ložiska nevytvářejí příliš velké vibrace, které by mohly ovlivňovat vlastnosti elektromotoru. Následující zkouškou bude zkouška hluková, která byla provedena dle normy ČSN EN ISO 3745 a vyhodnocena dle ČSN EN 60034 - 9. Hluková zkouška byla provedena v polobezodrazové hlukové komoře, kde hlučnost elektromotoru snímalo celkem 10 mikrofónů, které byly kolem něj rozmístěny v tzv. polokouli. Po zkoušce hluku následovala zkouška stanovení účinnosti, která byla provedena dle normy ČSN EN 60034-2 -1. Tato zkouška byla provedena připojením elektromotoru na dynamometr, na kterém se budeme snažit prokázat účinnost elektromotoru s dvěma různými ložisky (energeticky úsporná ložiska SKF E2 a standardně dodávaná ložiska ORS). Poslední zkouškou bylo snímání teplot ložisek elektromotoru v jeho ustáleném stavu, kdy jsme se snažili zjistit rozdíly teplot u obou druhů použitých ložisek. Čím vyšší je teplota u ložisek, tím nižší předpokládanou životnost ložisko bude mít, s čímž pak souvisí vyšší náklady pro odběratele při následné výměně ložisek. Po provedení všech výše uvedených zkoušek budou zkoušky vyhodnoceny a vzájemně porovnány a zároveň bude provedeno ekonomické zhodnocení výhodnosti použití dražších vysokoúčinnostních ložisek SKF E2 (E2.6208-2Z/C3)



v porovnání s ložisky od společnosti ORS. Veškerá měření budou provedena ve společnosti Siemens s.r.o., Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice.

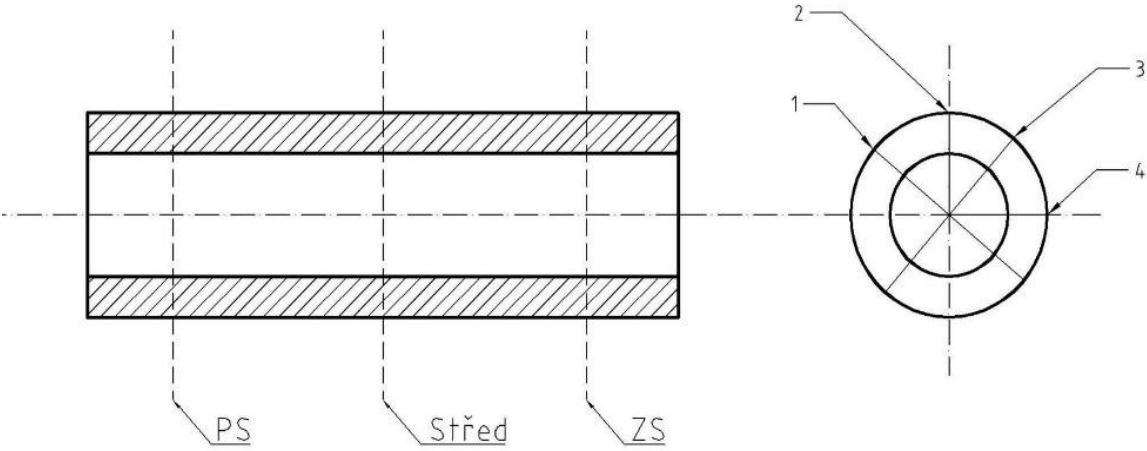
2.1 Základní mechanická měření statoru a rotoru, ověření vzduchové mezery

Základní mechanická měření statoru a rotoru jsou nutná z důvodu ověření správnosti vyrobených součástí. V případě, že součásti nejsou vyrobeny v předepsané toleranci pro nové dílce, dochází k narušení vzduchové mezery, která je v prostoru mezi rotorem a statorem elektromotoru. Veškerá měření potřebná pro ověření správnosti součástí byla provedena dne 13.2. 2014 ve společnosti Společnost Siemens s.r.o., Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice na prototypové dílně při teplotě okolí 21°C. Při měření byla použita kalibrovaná měřidla. Hodnoty, které byly naměřeny, splňovaly tolerance pro nové dílce, které jsou uvedeny na výkresech jednotlivých součástí. Z mechanických měření bylo vypočteno, že hodnota pro vzduchovou mezeru mezi rotorem a statorem je správná. Její hodnota z měření byla 0,668 mm, přičemž předepsaná hodnota je 0,650mm s tolerancí 10%. Z toho vyplývá, že elektromotor bude splňovat základní mechanické kritérium, aby plnil správně svoji funkci.

PS – přední strana

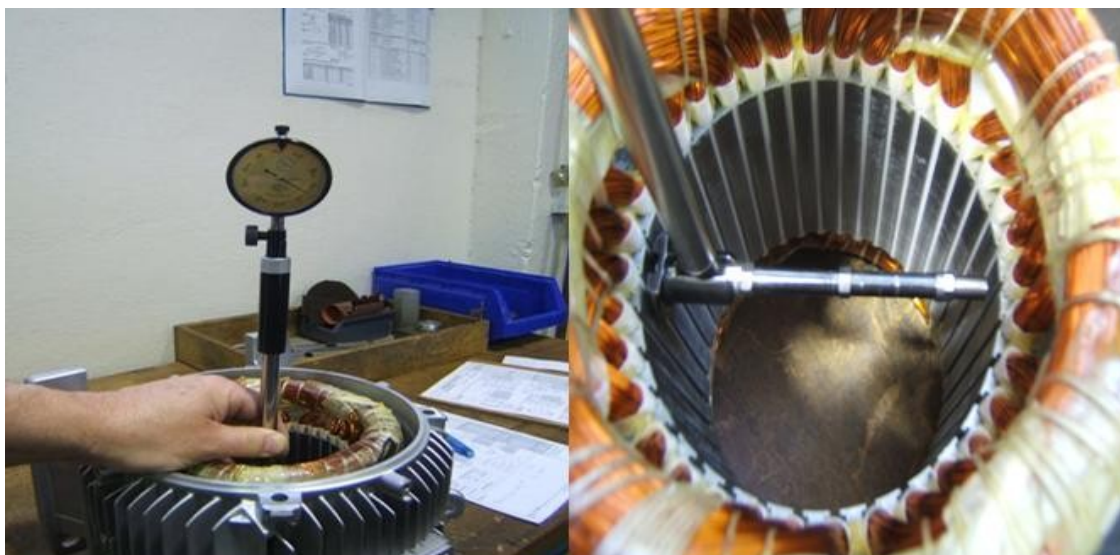
ZS – zadní strana

Tab. 2 Naměřené hodnoty mechanického měření u statoru

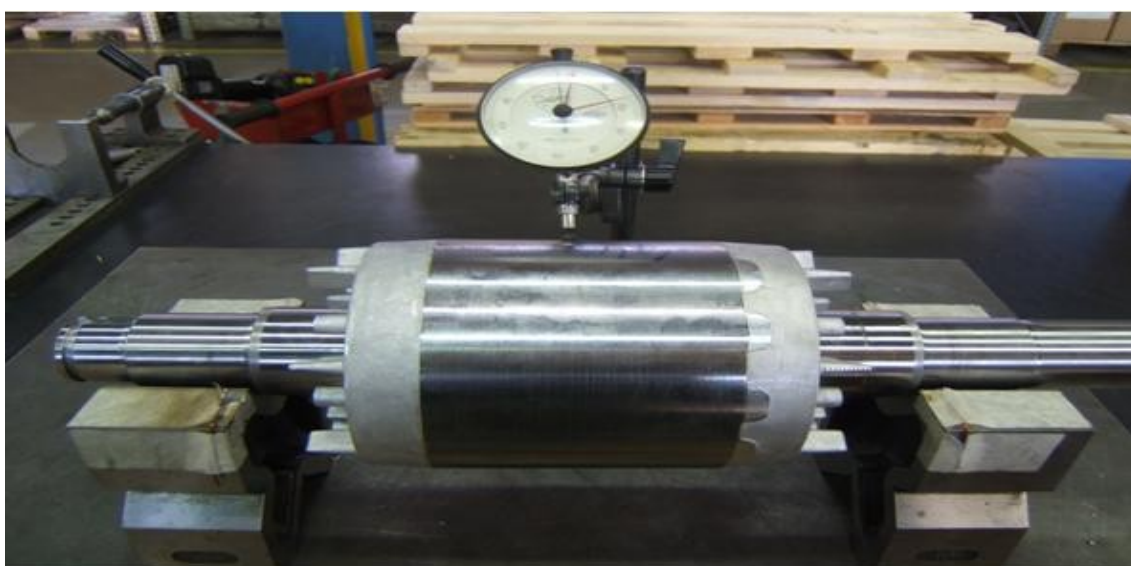
			
ϕ [μm] - (odchylka od kruhovitosti) – Průměr statoru 122,6 mm			
Střední průměr statoru 122,646 mm			
Měřící body dle výše uvedeného obrázku			
1 [μm]	2 [μm]	3 [μm]	4 [μm]
PS - 6	4	3	7
Střed - 5	4	5	6
ZS - 3	3	4	5
	Předepsaná hodnota	Naměřená hodnota	
Délka statoru [mm]	95	96	
Zalisování statoru [mm]	55	55,1	
PS – výška čela [mm]	57	56,5	
ZS – výška čela [mm]	60	59,5	

Tab. 3 Naměřené hodnoty mechanického měření u rotoru

Průměr rotoru [mm]		
Předepsaná hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	
121,30	PS - 121,312	
121,30	Střed - 121,308	
121,30	ZS - 121,311	
Házení rotoru k bodu A na výše uvedeném nákresu		
Předepsaná hodnota	Naměřená hodnota [mm]	
Do ϕ 135 mm maximální hodnota házení 0,025 mm. Nad ϕ 135 mm maximální hodnota házení 0,05 mm.	PS - 0,02	
	Střed - 0,01	
	ZS - 0,02	
	Předepsaná hodnota	Naměřená hodnota
Zalisování [mm]	L=69,6	69,5
Zalisování [mm]	L1=61	61
Délka rotoru [mm]	95	96,5



Obr. 29 Měření odchylky od kruhovitosti u statorového svazku



Obr. 30 Měření házení rotoru

2.2 Praktická montáž ložisek

Pro práci byla zvolena ložiska od dvou různých výrobců z různého kvalitativního spektra. Prvním výrobcem ložisek je turecká společnost ORS - Ortadogu Rulman Sanayi ve Tic.A.S, která byla založena jako první specializovaný výrobce ložisek v Turecku roku 1983 a je dodavatelem ložisek společnosti Siemens do prvovýroby elektromotorů. Tato ložiska od společnosti ORS například v porovnání s ložisky od společnosti SKF se vyznačují výrazně nižší cenou. Výrobce těchto ložisek na svých stránkách deklaruje jejich vysokou kvalitu, životnost, velmi nízkou hlučnost a zároveň deklaruje kvalitu výroby certifikátem ISO 9001. Dalšími použitými ložisky budou ložiska od společnosti SKF Group A. B, která je světově největším dodavatelem ložisek různých druhů. Předmětem této práce je prokázání vlastností



ložisek od společnosti SKF, která jsou označována jako SKF E2. Tato ložiska by měla být dle prohlášení výrobce vysokoúčinnější, tzn. že by měla v porovnání se standardními ložisky přinášet jistou úsporu energií, zvýšení účinnosti, nižší produkci tepla, což je výhodné pro ložisko z hlediska jeho zvýšené životnosti v porovnání s ostatními ložisky. U těchto ložisek klec a mazivo představují jednu z nejdůležitějších předností k dosažení úspor energií. V této práci budeme ověřovat deklarované vlastnosti SKF E2.[20][21]

Montáž ložisek na hřídel elektromotoru byla provedena následujícím způsobem. Pro usazení ložiska na hřídel rotoru je nutné jeho nahřátí, které je provedeno v našem případě v elektrické peci od společnosti SKF. V prvním případě u montáže ložisek ORS 6208-2Z/C3 s tukovou náplní ESO-UNIREX je zvolena teplota 110°C, která je předepsána jeho výrobcem. Tuto teplotu ložiska můžeme zvolit z důvodu, protože ložiska neobsahují žádné součásti z kompozitních polymerů. Ložisková klec, kryty, kuličky a kroužky jsou v tomto případě zhotoveny z ložiskové ocele 14 123, 14 129. Před montáží ložiska jsme provedli měření průměru hřídele pod ložiskem, které má být dle výkresu $40k6_{+0}^{+0,018}$, námi naměřená hodnota byla na přední straně rotoru PS 40,012 a na zadní straně ZS 40,010, což odpovídá rozměrům a toleranci, která je uvedena na výkrese. Po nahřátí ložiska v elektrické peci po dobu 5 minut můžeme ložisko za pomoci rukavic volně usadit na hřídel. Je nutné, aby ložisko volně dolehlo na dosedací plochu. Pro manipulaci s ložiskem je nutné využívat osobních ochranných prostředků, v tomto případě rukavic, aby nedošlo k poranění ruky z důvodu velmi vysoké teploty ložiska. Po vychladnutí ložisek opět zkontrolujeme za pomoci číselníkového úchylkoměru házení rotoru. V případě montáže ložisek ORS nebylo házení rotoru nijak ovlivněno a je stejné jako u výše uvedených měření v oddílu 2.1. Druhým ložiskem, které bylo montováno, je ložisko SKF E2.6208-2Z/C3. Pro toto ložisko musíme volit nižší teplotu nahřátí, a to 80°C z důvodu, že klec ložiska je zhotovena z kompozitního polymeru. Nahřátí ložiska volíme po stejnou dobu jako u ložiska ORS, a to 5 minut. Po konečné montáži pouze kontrolujeme házení rotoru. V případě montáže ložisek SKF nebylo házení rotoru nijak ovlivněno a je stejné jako u výše uvedených měření v oddílu 2.1.

Tab. 4 Porovnání rozměrů, hmotnosti a tvrdosti použitých ložisek

Výrobce ložiska	ORS	SKF
Označení	620850 C3	E2. 6208-2Z/C3
Země původu	Itálie	Turecko
Vnější průměr ložiska [mm]	80,008	80,000
Vnitřní průměr ložiska [mm]	39,995	39,996
Tloušťka [mm]	17,969	17,946
Hmotnost [g]	360	350
Hmotnost klece [g]	20	3
HRC tvrdost vnějšího kroužku [-]	59	62
HRC tvrdost vnitřního kroužku [-]	60	62



Obr. 31 Použitá ložiska



Obr. 32 Klec ložiska SKF E2 a ložiska ORS



Obr. 33 Měření tvrdosti vnitřního kroužku ložiska

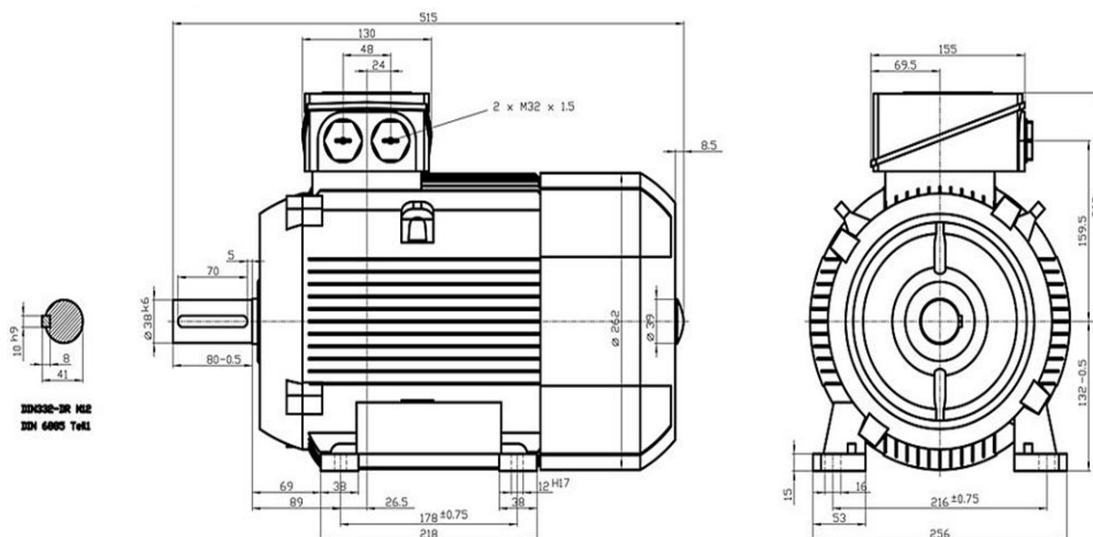
2.3 Montáž elektromotoru

Pro tuto práci byl zvolen elektromotor společnosti Siemens osově výšky 132 mm 1LE1005-1CA134. Elektromotor 1LE1005-1CA134 je třífázový asynchronní nízkonapěťový elektromotor s kotvou nakrátko pro použití k pohonu průmyslových zařízení, kterými mohou být například obráběcí stroje, lisy, čerpadla, ventilátory a jiné. Tyto elektromotory je možné využívat ve všech průmyslových odvětvích. Elektromotory řady 1LE lze používat v různých klimatických podmínkách. Pro praktickou zkoušku bylo využito elektromotoru dvoupólového, u kterého je při zapojení do trojúhelníku a jmenovitém napětí 400V/50Hz

výkon 7,5 kW při otáčkách 2950 min^{-1} . Kostra, štíty a kryt svorkovnice jsou na tomto elektromotoru zhotoveny z tlakově lité hliníkové slitiny, jelikož se jedná o elektromotor v základní specifikaci. Pro potřeby praktické zkoušky byl vzorek elektromotoru kompletován na prototypové dílně. Při kompletaci elektromotoru je nutné dodržovat veškerá ustanovení, která jsou daná technickým předpisem pro montáž.[22]

Tab. 5 Specifikace použitého elektromotoru

Velikost (osová výška) [mm]	132
Výkon [kW]	7,5
Otáčky [min^{-1}]	2950
Jmenovité napětí [V]	400/690
Frekvence [Hz]	50
Jmenovitý proud [A]	14,1
Ložisko PS	6208-2Z/C3
Ložisko ZS	6208-2Z/C3
Krytí	IP 55
Vyvážení rotoru	Stupeň vibrací A
Váha [kg]	42
Počet pólů	2
Energetická účinnost	IE2



Obr. 34 Výkres elektromotoru 1LE1005-1CA134 osové výšky 132 mm [22]

Potup montáže elektromotoru

- Prvním krokem při montáži elektromotoru je nalisování statorového svazku do kostry z hliníkové slitiny. Usazení se provádí nahřátím hliníkové kostry v elektrické peci na teplotu 350°C. Po dokončení nahřívání je kostra volně nasazena na statorový svazek, který je umístěn v přípravku. Po nalisování kostry je nutná kontrola zalisování, která je v našem případě v pořádku. Zalisování je uvedeno v oddílu 2.1. Na závěr je nutné provlečení kabelů do prostoru svorkovnice.
- Druhým krokem při montáži je zalisování rotorového svazku na hřídel. Při lisování je hřídel umístěna v přípravku a potřena mazacím tukem. Na hřídel se volně usadí rotorový svazek, který je poté zalisován tlakem cca. 6 MPa. Po lisování je nutná kontrola házení rotoru. Dále následuje operace přetočení rotoru na potřebný průměr, po které přijde na řadu dynamické vyvážení na stupeň vibrací A. Na kompletní rotor s hřídelí je možné provést montáž obou ložisek.
- Závěrečnou kompletaci elektromotoru provádíme nejprve umístěním předem připraveného štítu na straně ventilátoru. Do předem připraveného štítu je vetřeno mazací tuk na místech, kde budou ložiska, a štít dotáhneme šrouby M8 momentem 20 N.m⁻¹. Další operací je vložení rotoru do již předem připraveného svazku s kostrou. Při usazování rotoru musíme dbát zvýšené opatrnosti, abychom neponičili statorový svazek. Za pomoci momentového klíče. Výše uvedený postup opakujeme i u druhého štítu. Elektromotor otočíme a za pomoci přípravku a hliníkové paličky volně

naklepeme plastový ventilátor, na který je poté možno umístit jeho kryt. Dále přišroubujeme svorkovnici a na svorkové desky připojíme jednotlivé kabely ze satorového svazku. Na závěr montáže umístíme prachovku na zadní stranu elektromotoru a volně naklepeme klínek. Poslední nutnou operací je kontrola elektrických parametrů při chodu naprázdno.



Obr. 35 Utahování šroubů na štítu za pomoci momentového klíče

3. Měření dat

3.1 Měření hladiny mohutnosti vibrací dle normy ČSN EN 60034 – 14

Měření hladiny mohutnosti vibrací bylo provedeno dle normy ČSN 60034 – 14 (Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm – Měření, hodnocení a mezní hodnoty vibrací), která předepisuje měření vibrací na 6 různých místech elektromotoru. Měření v našem případě bylo provedeno pouze na 5 místech elektromotoru, a to z důvodu, že 6. měřící místo je na místě ventilátoru. Ventilátor by měl být z tohoto důvodu demontován, ale nebude, jelikož ventilátor je nutnou součástí elektromotoru a jeho demontáží by celkové vibrace mohly být příliš zkresleny. Měřenými hodnotami při určování mohutností vibrací jsou výchylka, která je vyjádřena v mikrometrech, rychlost vibrací je vyjádřena v milimetrech za sekundu a zrychlení vibrací je vyjádřena v m/s^2 . Velikost vibrací je možno vyjádřit jako efektivní hodnotu širokopásmových vibrací na ložiscích elektromotoru ve frekvenčním rozsahu 10 Hz – 1000 Hz. Tyto hodnoty by měly zaznamenávat i snímače určené k měření vibrací a to dle požadavků normy ISO 2954. Zařízení určená ke snímání vibrací by měla

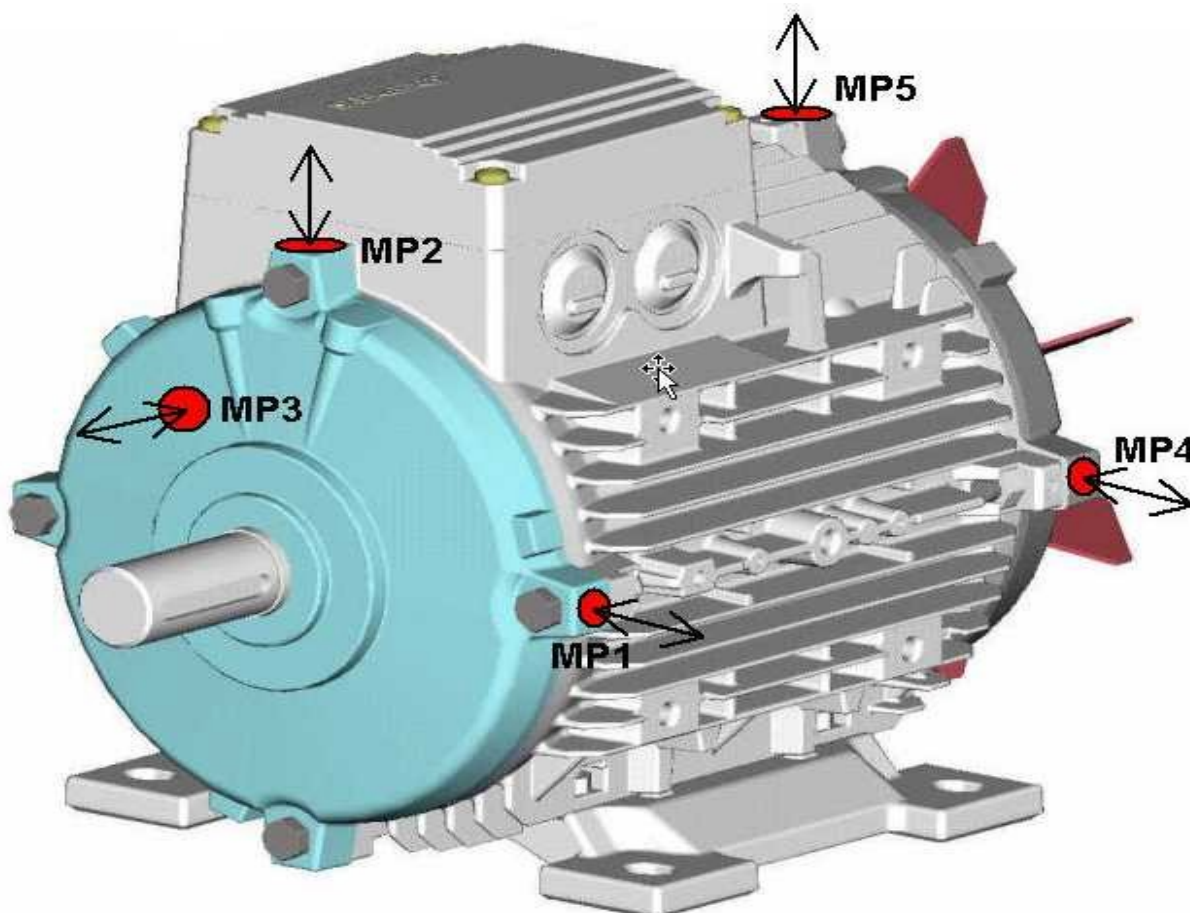
splňovat několik požadavků, kterými jsou velký dynamický rozsah, široký kmitočtový rozsah, zanedbatelný rušivý účinek vnějších vlivů např. (teplota, hluk aj.), stabilita v čase a nakonec velmi nízké zkreslování výstupního signálu. Na mohutnost vibrací elektromotoru má vliv jeho montáž. Z tohoto důvodu je nutné měření vibrací za předem stanovených podmínek, které nám umožní opakovatelnost měření z důvodu jeho objektivnosti a případných dalších nejasností. V případě našeho měření bylo využito jak pružného uložení elektromotoru na podložce ze Sylomeru SR11, tak i pevného uložení, kdy elektromotor bude v obou případech spuštěn na prázdko. Běh na prázdko je nutný z důvodu, aby se projevíly vibrace pouze samotného elektromotoru, které jsou pro nás rozhodující. Při měření byla drážka v hřídeli, která je určena pro montáž pera, vyplněna tzv. púlperem. Púlpero bylo použito z důvodu, aby hřídel s rotorem byla vyvážená a nevznikly v průběhu měření vibrace, které by negativním způsobem ovlivnily celkový výsledek. Snímací zařízení a jeho montáž musí plně odpovídat specifikaci, která je předepsána jeho výrobcem a zároveň je nutné, aby hmotnost snímacího zařízení byla nižší než 1/50 celkové hmotnosti použitého elektromotoru. Nejlepší ustavení snímače vibrací na elektromotoru je za pomoci šroubu, je vhodné z důvodu vysoké tuhosti a možnosti dosažení vysokého rezonančního kmitočtu v rozsahu 15 -30 kHz. Při tomto druhu upevnění je nutné dodržet kolmost díry vůči povrchu zařízení. Zároveň musí být šroub utažen předepsaným momentem. V případě nesprávného upevnění snímače může nastat mechanické namáhání, které může následně způsobit zkreslení měření. Dále můžeme využít upevnění snímače vibrací za pomoci magnetů. Tento způsob je vhodný využívat pouze u elektromotorů, které mají kostru z feromagnetického materiálu. Protože kostra použitého elektromotoru je hliníková, nemůžeme využít magnetu. Proto u hliníkového materiálu využijeme k upevnění snímače červeného včelího vosku. Spojení elektromotoru a čidla pomocí vosku je vhodné z důvodu, že jsme schopni dosáhnout rezonancí na kmitočtech až 20 kHz. Spojení včelím voskem se ovšem nedoporučuje na místech, kde je příliš vysoká teplota, jelikož by mohlo dojít k natavení vosku a následně odpadnutí čidla. Dalším možným řešením upevnění čidla na elektromotoru je použití lepidla. [23][24]

V měřeních, prováděných na dvoupólových elektromotorech, mají tyto motory velmi často na kmitočtu odpovídajícím dvojnásobku skluzového kmitočtu určité vibrační zázneje. Proto je nutné stanovit rozhodující velikost vibrací ze vztahu:[24]

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_{max}^2 + x_{min}^2}{2}}$$

V rovnici platí:[24]

- x_{\max} – maximální efektivní hodnota rychlosti v [mm/s], zrychlení a [m/s²] a výchylky s [μm]
- x_{\min} – minimální efektivní hodnota rychlosti v [mm/s], zrychlení a [m/s²] a výchylky s [μm]



Obr. 36 Měřicí body pro měření vibrací na elektromotoru [25]

Tab. 6 parametry elektromotoru při měření vibrací

Typ elektromotoru - Siemens	1LE1005-1CA134
Výkon [kw]	7,5
Otáčky [min⁻¹]	2950
Napětí [V]	400
Frekvence [Hz]	50

Tab. 7 Maximální hodnoty vibrací dle normy ČSN EN 60034 - 14

	Výška osy [mm]	56 ≤ H ≤ 132		
Stupeň vibrací	Uložení	Výchylka [μm]	Rychlost [mm/s]	Zrychlení [m/s ²]
A	Pružné uložení	25	1,6	2,5
A	Pevné uložení	21	1,3	2,0

Výsledky měření vibrací elektromotoru osazeného ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3

Tab. 8 Výsledky vibrační zkoušky s ložisky SKF – Pružné uložení

Uložení	Výchylka s_{eff} [μm]	Rychlost v_{eff} [mm/s]	Zrychlení a_{eff} [m/s ²]	Měřicí místo
Pružné uložení	2,4	0,46	0,70	1
	3,0	0,51	0,83	2
	1,9	0,48	1,46	3
	3,6	0,82	0,85	4
	4,7	0,95	0,73	5
Hodnoty dle normy	25	1,6	2,5	-

Tab. 9 Výsledky vibrační zkoušky s ložisky SKF – Pevné uložení

Uložení	Výchylka s_{eff} [μm]	Rychlost v_{eff} [mm/s]	Zrychlení a_{eff} [m/s^2]	Měřicí místo
Pevné uložení	1,2	0,51	0,66	1
	0,4	0,21	0,88	2
	0,7	0,31	0,96	3
	1,7	0,75	1,16	4
	0,5	0,41	0,85	5
Hodnoty dle normy	21	1,3	2,0	-

Ložiska SKF E2.6208-2Z/C3, která byla namontována v elektromotoru Siemens 1LE1005-1CA134, splnila požadavky normy ČSN EN 60034 – 14 v požadavcích na vibrace jak pružném uložení elektromotoru na podložce ze Sylomeru SR11, tak i pevném uložení. Zároveň byly hodnoty naměřeny v průměru až o 70 % nižší než jaké předepisuje norma.

Výsledky měření vibrací elektromotoru osazeného ložisky ORS 620850 C3

Tab. 10 Výsledky vibrační zkoušky s ložisky ORS – Pružné uložení

Uložení	Výchylka s_{eff} [μm]	Rychlost v_{eff} [mm/s]	Zrychlení a_{eff} [m/s^2]	Měřicí místo
Pružné uložení	2,40	0,72	1,03	1
	1,87	0,58	0,99	2
	1,78	0,68	1,48	3
	3,4	0,97	0,86	4
	3,15	0,95	0,72	5
Hodnoty dle normy	25	1,6	2,5	-

Tab. 11 Výsledky vibrační zkoušky s ložisky ORS – Pevné uložení

Uložení	Výchylka s_{eff} [μm]	Rychlost v_{eff} [mm/s]	Zrychlení a_{eff} [m/s^2]	Měřicí místo
Pevné uložení	1,3	0,49	0,71	1
	0,71	0,26	0,96	2
	0,93	0,29	1,11	3
	1,92	0,77	0,85	4
	0,62	0,45	0,89	5
Hodnoty dle normy	1,3	2,0	21	-

Ložiska ORS 620850 C3, která byla namontována v elektromotoru Siemens 1LE1005-1CA134, splnila požadavky normy ČSN EN 60034 – 14 v požadavcích na vibrace jak pružném uložení elektromotoru, tak i pevném. Zároveň byly naměřené hodnoty v průměru až o 70 % nižší než jaké předepisuje norma.

Ložiska ORS 620850 C3 a SKF E2.6208-2Z/C3, která byla namontována v elektromotoru Siemens 1LE1005-1CA134 osově výšky 132 mm, splnila veškeré požadavky normy ČSN EN 60034 – 14 v požadavcích na vibrace jak pružném uložení elektromotoru na podložce ze Sylomeru SR11, tak i pevném uložení. Zároveň byly naměřené v průměru až o 70 % nižší, než jaké předepisuje norma. V případě této zkoušky byly mírně lepší výsledky podle tabulek u ložiska SKF E2.6208-2Z/C3.



Obr. 37 Pružné a pevné uložení elektromotoru během měření vibrací



Obr. 38 Čidlo Adash 125 připevněné na kostru elektromotoru pomocí včelího vosku



Obr. 39 eProTeam program pro vyhodnocení vibrací

3.2 Ověření hlučnosti dle normy ČSN EN ISO 3745

Ověření hlučnosti elektromotoru bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 3745 (Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti). Zkouška byla provedena na elektromotoru společnosti Siemens 1LE1005-1CA134 osově výšky 132mm, který byl v prvním případě osazen ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3 a ve druhém ložisky ORS 620850 C3, u kterých se budeme snažit měřením prokázat rozdíly v hlučnosti při jejich osazení ve výše zmíněném elektromotoru. Při ověřování hlučnosti zjišťujeme hladinu akustického tlaku (Pa), která představuje efektivní hodnotu okamžitého akustického tlaku v prostoru, která je určena ve stanoveném intervalu. Z naměřených hodnot akustického tlaku (Pa) je možné vypočítat hladinu akustického výkonu (dB). Na přístroje určené k ověřování hlučnosti, které spadají do třídy 1, jako jsou mikrofony, kabely aj., jsou kladeny přísné požadavky dle normy IEC 61672-1:2002. Na filtry použité při zkoušce jsou kladeny přísné požadavky ovšem dle normy IEC 61260:1995. Před každým ověřováním hlučnosti je nutná kalibrace všech deseti použitých mikrofonů za pomoci kalibrátoru B&K 4231, který náleží do třídy přesnosti 1, která je v tomto případě stanovena normou IEC 60942:2003. Tuto normu musí kalibrátor splňovat z důvodu možnosti ověření celého měřicího systému a to na frekvencích, na kterých je měřeno. Dále kalibrátor podléhá normě IEC 61672-1, která předepisuje jeho kalibraci v návaznosti na daný etalon. Pro ověření hlučnosti je nutné užít následujících přístrojů, kterými jsou přístroj pro měření atmosférického tlaku, teploty a relativní vlhkosti. U přístroje pro měření atmosférického tlaku je možná nepřesnost při měření, která je rovna nebo menší než 2 %. V případě přístroje pro měření teploty je přípustná nejistota měření rovna nebo menší než 1°C. Během vlastního měření je přípustná maximální teplota v rozmezí 15 - 30°C z důvodu, že při nižších nebo naopak vyšších teplotách může dojít ke zkreslení měřených hodnot, což je nežádoucí. Dále je nutné užít přístroje pro měření relativní vlhkosti okolí, u kterého je nejistota měření rovna nebo menší než 10%. Při samotném ověřování hlučnosti je velmi důležitým faktorem to, jak je zkoušený elektromotor instalován v polobezodrazové hlukové komoře a následně i dále provozován. Pokud by byl elektromotor špatně instalován a následně chybně provozován, mohlo by docházet ke zkreslení akustického výkonu, který vyzařuje snímáný elektromotor. Snímáný elektromotor je důležité umístit v polobezodrazové hlukové komoře tak, aby byl zajištěn dostatečný prostor, který dokonale obklopí snímáný elektromotor. Při samotné montáži elektromotoru v hlukové komoře je nutné se řídit všeobecně platnými předpisy, které jsou určeny pro montáž zdroje hluku. Během ověřování

hlučnosti byl elektromotor umístěn volně na pružné podložce, a to molitanu. V průběhu zkoušky byl elektromotor provozován bez zatížení tj. naprázdno. Z tohoto důvodu je nutné předem stanovit veškeré zkušební podmínky, které musí být během měření konstantně udržovány. Jednou z podmínek je uvedení zdroje hluku do požadovaného stavu ještě před zahájením samotného měření. Měření hodnot akustického tlaku je provedeno v rozmezí 100 - 10000 Hz, kdy každá frekvence bude měřena po dobu 30 sekund. Při hodnotách nad 10000 Hz již dochází k atmosférickému útlumu, který je nutné kompenzovat dle normy ISO 9613-1. Z tohoto důvodu bylo měření provedeno maximálně do hodnoty 10000 Hz. Zdroj hluku byl obklopen celkem deseti mikrofony B&K 4942 v takzvané polokouli, která byla umístěna ve středu hlukové komory. Pro analýzu výsledků byl využit přístroj B&K PULSE 3560C. Během celého měření je nutné udržovat veškeré metrologické podmínky.[26][27]

Při ověřování hlučnosti je měřenou hodnotou hladina akustického tlaku, ze které je nutné určit akustický výkon. Akustický výkon je spjat s postupující akustickou vlnou, která přenáší určité množství energie. Akustický výkon vyjadřuje množství energie, které projde za jednotku času určitou plochou.[26]

Akustický výkon je možné vyjádřit vztahem:[26]

$$W = p \cdot v \cdot S$$

V rovnici platí následující:

p - hodnota akustického tlaku [Pa]

v - akustická rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

S - měřená plocha, která je kolmá na zvukový paprsek [m^2]

Hladina akustického výkonu, která je vztažena ke kmitočtu, je vyjádřena vztahem:[26]

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

V rovnici platí následující:

W - referenční akustický výkon [W]

W_0 – sledovaný akustický výkon [W]

Hodnota W_0 je určena následujícím vztahem:[26]

$$W_0 = 10^{-12} W$$

Tab. 12 Podmínky během ověřování hlučnosti elektromotoru s ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3

Typ elektromotoru Siemens	1LE1005-1CA134
Otáčky elektromotoru [min^{-1}]	2950
Napětí [V]	400,4
Frekvence [Hz]	50,01
Proud [A]	6,04
Příkon [W]	258,4
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	22,80
Tlak [kPa]	98,30
Vlhkost [%]	31,10
Rosný bod [$^{\circ}\text{C}$]	4,90
Počet mikrofónů	10 B&K 4942
Analyzátor	B&K PULSE 3560C



Tab. 13 Naměřené hodnoty akustického tlaku a vypočtené hodnoty akustického výkonu s ložisky SKF E2. 6208 – 2Z/C3

Hladina akustického tlaku		Hladina akustického výkonu	
Frekvence Hz	$L_{pf}(A)$ [dB]	Frekvence Hz	$L_w(A)$ [dB]
100	31,01	100	38,08
125	35,32	125	42,38
160	40,77	160	47,84
200	46,71	200	53,77
250	49,48	250	56,55
315	57,12	315	64,19
400	55,24	400	62,31
500	57,19	500	64,25
630	56,90	630	63,97
800	56,94	800	64,01
1000	60,12	1000	67,18
1250	56,48	1250	63,54
1600	63,02	1600	70,09
2000	60,65	2000	67,72
2500	58,05	2500	65,11
3150	60,62	3150	67,69
4000	56,27	4000	63,33
5000	52,22	5000	59,29
6300	50,29	6300	57,35
8000	46,41	8000	53,48
10000	42,09	10000	49,16

Tab. 14 Výsledek ověření hlučnosti elektromotoru s ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3 [28]

Celková hladina akustického tlaku	Celková hodnota akustického výkonu	Celková hladina akustického tlaku ve vzdálenosti 1m
$L_{pf,celk}(A)$ [dB]	$L_{w,celk}(A)$ [dB]	$L_{pf,celk}(A)$ [dB]
69,87	76,93	63,63
Maximální přípustná hodnota akustického tlaku [dB]	Maximální přípustná hodnota dle normy ČSN EN 60034-9 [dB]	Maximální přípustná hodnota akustického tlaku [dB]
78	85	78

Ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3, která byla namontována v elektromotoru Siemens 1LE1005-1CA134, splnila požadavky normy ČSN EN 60034 – 9 v požadavcích na maximální hodnoty hluku. Zároveň byla celková hodnota akustického tlaku o 10% nižší, než předepisuje norma.

Tab. 15 Podmínky během ověřování hlučnosti s ložisky ORS 620850 – C3

Typ elektromotoru Siemens	1LE1005-1CA134
Otáčky elektromotoru [min^{-1}]	2950
Napětí [V]	399,9
Proud [A]	5,99
Frekvence [Hz]	50,01
Příkon [W]	270,7
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	20,80
Tlak [kPa]	98,40
Vlhkost [%]	33,20
Rosný bod [$^{\circ}\text{C}$]	4,10
Počet mikrofónů	10 B&K 4942
Analýzátor	B&K PULSE 3560C



Tab. 16 Naměřené hodnoty akustického tlaku a vypočtené hodnoty akustického výkonu s ložisky ORS 620850 – C3

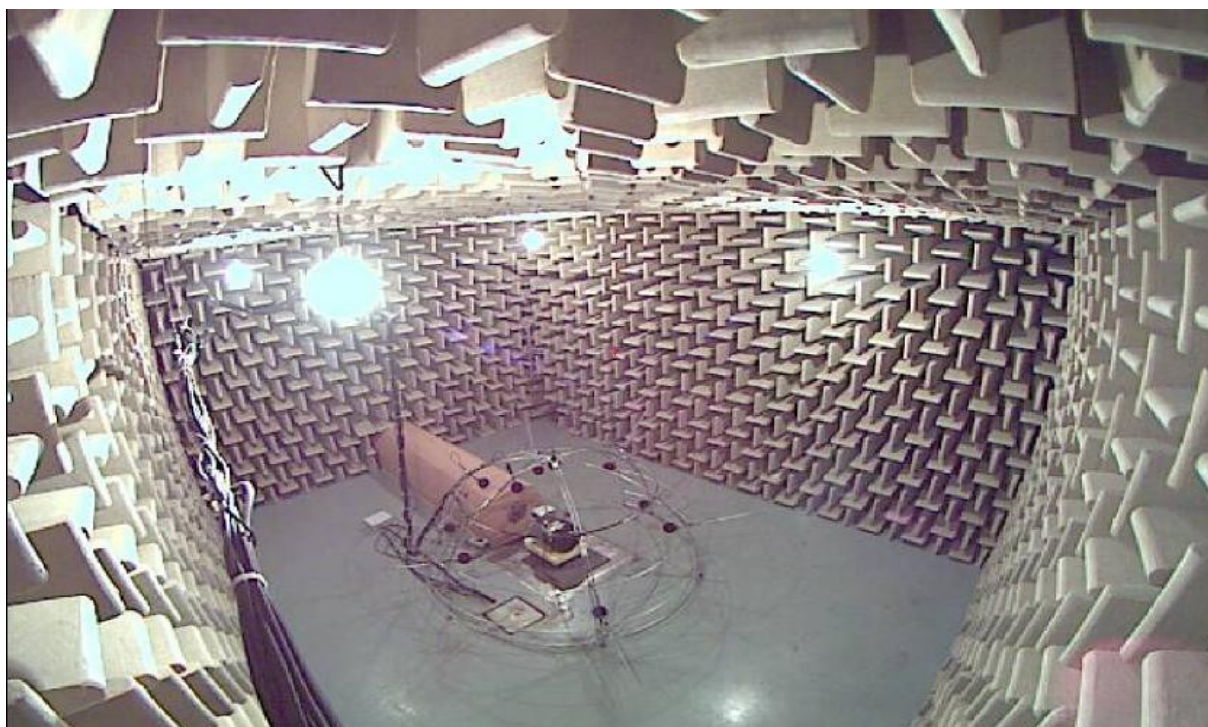
Hladina akustického tlaku		Hladina akustického výkonu	
Frekvence Hz	$L_{pf}(A)$ [dB]	Frekvence Hz	$L_w(A)$ [dB]
100	31,42	100	38,49
125	35,28	125	42,35
160	40,81	160	47,88
200	46,81	200	53,88
250	49,65	250	56,72
315	57,42	315	64,48
400	55,40	400	62,47
500	57,08	500	64,15
630	56,90	630	63,96
800	56,99	800	64,06
1000	59,67	1000	66,74
1250	56,90	1250	63,97
1600	63,89	1600	70,96
2000	61,01	2000	68,08
2500	58,36	2500	65,42
3150	61,08	3150	68,15
4000	56,58	4000	63,65
5000	53,05	5000	60,12
6300	50,82	6300	57,88
8000	48,20	8000	55,27
10000	43,87	10000	50,94

Tab. 17 Výsledek ověření hlučnosti elektromotoru s ložiska ORS 620850 – C3 [28]

Celková hladina akustického tlaku	Celková hodnota akustického výkonu	Celková hladina akustického tlaku ve vzdálenosti 1m
$L_{pf,celk}(A)$ [dB]	$L_{w,celk}(A)$ [dB]	$L_{pf,celk}(A)$ [dB]
70,22	77,29	63,99
Maximální přípustná hodnota akustického tlaku [dB]	Maximální přípustná hodnota dle normy ČSN EN 60034-9 [dB]	Maximální přípustná hodnota akustického tlaku [dB]
78	85	78

Ložiska ORS 620850 – C3, která byla namontována v elektromotoru Siemens 1LE1005-1CA134, splnila požadavky normy ČSN EN 60034 – 9 v požadavcích na maximální hodnoty hluku. Zároveň byla celková hodnota akustického tlaku o 9% nižší, než předepisuje norma.

Ložiska ORS 620850 C3 a SKF E2.6208-2Z/C3, která byla namontována v elektromotoru Siemens 1LE1005-1CA134 osově výšky 132 mm, splnila veškeré požadavky normy ČSN EN 60034 – 9 v požadavcích na maximální hodnoty hluku. Zároveň byly naměřené hodnoty v průměru až o 9,5 % nižší, než jaké předepisuje norma. V případě této zkoušky byly lepší výsledky u ložiska SKF E2.6208-2Z/C3.



Obr. 40 Elektromotor v průběhu ověřování hlučnosti



Obr. 41 Elektromotor umístěný v tzv. polokouli a mikrofon B&k 4942

3.3 Stanovení účinnosti elektromotoru dle normy ČSN EN 60034 – 2 – 1

Stanovení účinnosti a ztrát elektromotoru bylo provedeno dle normy ČSN EN 60034 – 2 – 1 (Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek s výjimkou strojů pro trakční vozidla). Energetickou účinnost je možné vyjádřit jako podíl využité energie vůči vložené a bývá zpravidla uváděna v procentech. Veškeré dílčí zkoušky, tvořící potřebný zkušební postup k určení účinnosti elektromotoru, je nutné provádět v určitém sledu. U dílčích zkoušek je nutné, aby nebyly prováděny se zpožděním z důvodu, že před opětovným získáním údajů by bylo nutné znovudosažení stanovených teplot. Existuje několik metod určení účinnosti, a to přímé a nepřímé. Zkoušky pro určení účinnosti rozdělujeme do tří kategorií. První z nich je měření vstupního i výstupního výkonu na elektromotoru. Tento způsob zahrnuje měření vstupního elektrického a výstupního mechanického výkonu. Druhou metodou k určení účinnosti elektromotoru je měření vstupu i výstupu na dvou naprosto stejných elektromotorech, které jsou vzájemně mechanicky spojeny při rekuperačním zapojení. Rekuperační zapojení se využívá z důvodu vyloučení měření mechanického výkonu, který je do stroje přiváděn nebo odváděn. Posledním způsobem určení účinnosti je měření skutečných ztrát v elektromotoru za jistých podmínek. Zpravidla to nejsou celkové ztráty, ale zahrnují jednotlivé složky ztrát. Tato metoda může být využita jak pro výpočet celkové ztráty, tak i pro výpočet určité složky ztrát. Pro určení ztrát v elektromotoru se využívá měření naprázdno bez

jakéhokoliv vnějšího zatížení. Konstantní ztráty označované P_k jsou součtem celkových ztrát v železe P_{fe} (ztráty v magnetickém obvodu elektromotoru), ztrát ventilačních P_{fw} a ztrát třecích P_{fw} . V případě naší práce se zaměříme na ztráty ventilační a třecí. Ventilační ztráty jsou ztráty způsobené celkovým aerodynamickým třením. Aerodynamické tření se vykytuje především na ventilátoru elektromotoru, který způsobuje největší aerodynamické tření. Aerodynamické tření způsobuje nežádoucí mechanické ztráty. Ztráty způsobené třením jsou v elektromotoru především v ložiscích. Veškeré ztráty v ložiscích vycházejí z jejich pracovní teploty a teploty maziva. Z tohoto důvodu se snažíme v této práci prokázat vhodnost použití energeticky účinných ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3 oproti standardně dodávaným ložiskům ORS 620850 – C3.[29]

Tab. 18 Podmínky během měření účinnosti a ztrát

Typ elektromotoru Siemens	1LE1005-1CA134
Osová výška [mm]	132
Otáčky elektromotoru [min⁻¹]	2950
Napětí [V]	400
Proud [A]	14,1
Frekvence [Hz]	50,01

Tab. 19 Účinnost a ztráty u elektromotoru osazeného ložisky SKF E2 a ORS

SKF E2. 6208-2Z/C3		-	ORS 620850 – C3		-
Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota	-	Jmenovitá hodnota	Naměřená hodnota	Rozdíl naměřených hodnot
88,1	89,57	Účinnost [%]	88,1	88,96	0,61

Tab. 20 Jednotlivé naměřené ztráty s projevením ventilačních ztrát

SKF E2. 6208-2Z/C3	-	ORS 620850 – C3
281,0	Celkové ztráty měřené bez zatížení [W]	328,0
80,120	Ztráty ve vinutí ΔP_s [W]	79,50
137,40	Ztráty v železe ΔP_{fe} [W]	166,10
63,40	Mechanické ztráty ΔP_{fw} [W]	82,40

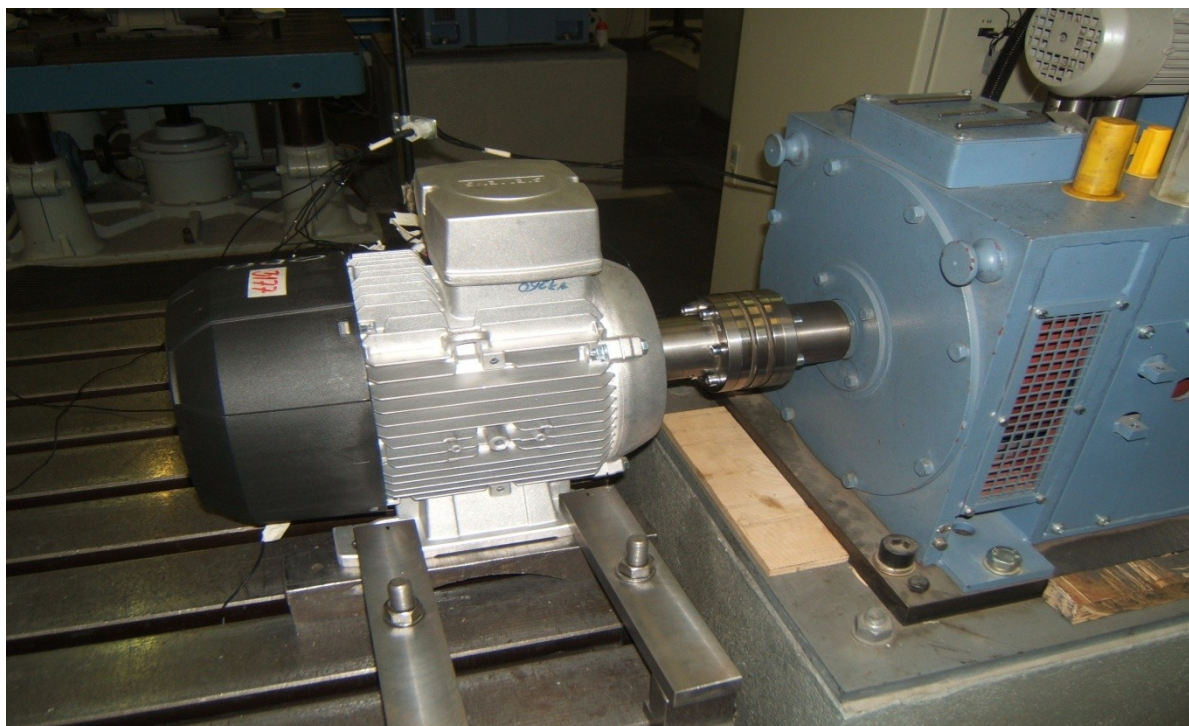
Tab. 21 Ventilační ztráty

Naměřené mechanické ztráty s ventilátorem [W]	Naměřené mechanické ztráty bez ventilátoru [W]	Ventilační ztráty [W]
82,4	29,77	52,63

Tab. 22 Jednotlivé naměřené ztráty bez projevení ventilačních ztrát

SKF E2. 6208-2Z/C3	-	ORS 620850 – C3
281,0	Celkové ztráty měřené bez zatížení [W]	328,0
80,120	Ztráty ve vinutí ΔP_s [W]	79,5
137,40	Ztráty v železe ΔP_{fe} [W]	166,10
10,77	Mechanické ztráty ΔP_{fw} [W]	29,77

Metoda výpočtu účinnosti elektromotoru vychází z normy ČSN EN 60034 – 2 – 1. Tato norma vychází ze stanovení jednotlivých příspěvků ztrát v elektromotoru. Budeme-li vyšetřovat příspěvek ztrát způsobených třením v ložiscích, je příspěvek ztrát ložisek SKF E2. 6208 – 2Z/C3 přibližně o 20 W nižší. Toto má za následek zvýšení účinnosti o cca 0,3 %. Tento příspěvek je měřitelný není však z celkové účinnosti elektromotoru až tak významný.



Obr. 42 Měření účinnosti na dynamometru

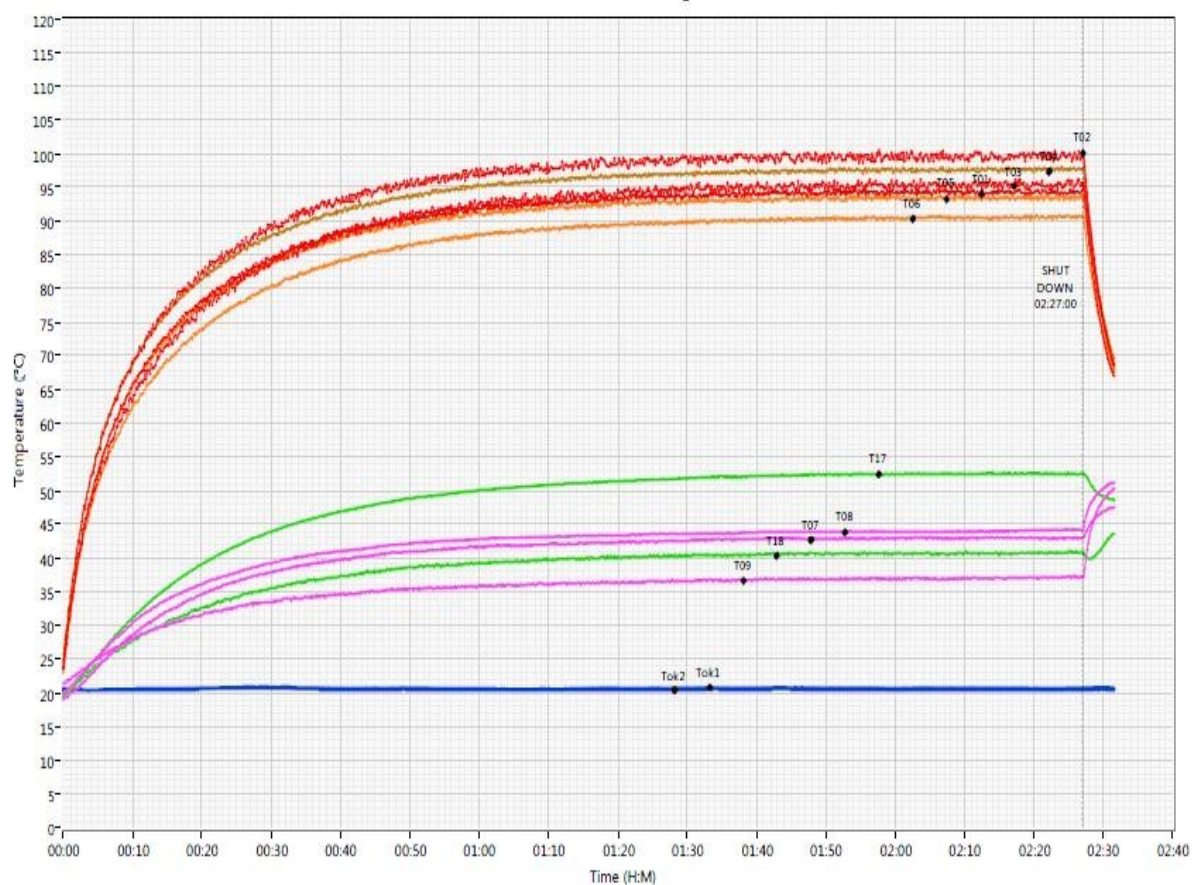
3.4 Teploty ložisek a elektromotoru v ustáleném stavu při jmenovitém výkonu

Teploty byly snímány na celkem jedenácti místech elektromotoru za použití termočlánků včetně vnějších kroužků ložisek. Termočlánky jsou založeny na tzv. Seebeckovu jevu, který říká, že dochází k převodu tepelné energie na energii elektrickou. Při snímání teplot budou využity termočlánky společnosti Omega Engineering Inc. typu J. Termočlánky typu J jsou rozpoznatelné z vnější části díky černé barvě vnější izolace. Dalším poznávacím znakem jsou vnitřní prameny článku, kdy první má černou barvu izolace a je zhotoven z Fe (železa) a druhý, který má bílou barvu izolace, je zhotoven z kombinace materiálu Cu-Ni. Maximální možná teplota u termočlánku typu J je -210°C až $+1200^{\circ}\text{C}$. Pro měření je ovšem rozsah maximální teploty značně omezen a to na teploty od 0°C do 750°C , a to z důvodu přesnosti zaznamenaných hodnot, jelikož termočlánky typu J mohou vykazovat ve standardním limitu nepřesnost od 0 do 0,75%, což odpovídá rozsahu odchylky od 0°C do $2,2^{\circ}\text{C}$. U veškerých druhů termočlánků se mohou vyskytovat dva druhy parazitních vlivů. Prvním parazitním vlivem je chyba měřicího spoje, který může vzniknout například poškozením termočlánku, stárnutím aj. Druhým parazitním vlivem může být chyba srovnávacího spoje, která může být kompenzována konstantní teplotou srovnávacího spoje, případně elektrickou kompenzací parazitního termoelektrického napětí. Kompenzace může být pasivní, případně aktivní. Pro úspěšné snímání teplot je nutné konce termočlánku svařit pomocí svařovacího zdroje

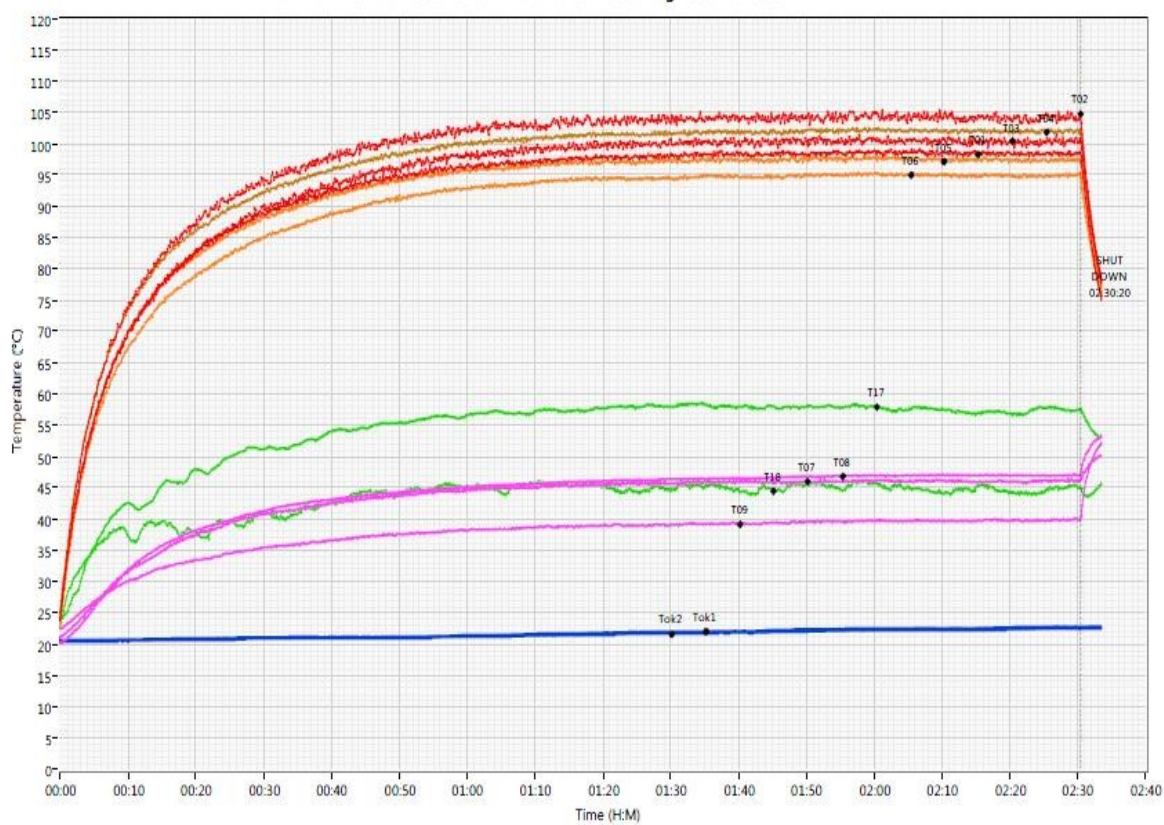
s kondenzátorovými bateriemi technologií hrotového zážehu. Na použité svářečce Omega TL-WELD je možné svařovat termočlánky do maximálního průměru 1,1 mm. Svářečka má pracovní cyklus 5 až 10 svárů za minutu. Po provedení sváru je nutná jeho kontrola z důvodu správné funkce v následné aplikaci. Kontrola je provedena nejprve opticky zhodnocením kvality sváru a poté je nutné přeměření článku pomocí digitálního multimetru. Po umístění jednotlivých termočlánků na různá místa elektromotoru je zajistíme proti pohybu. Elektromotor je během snímání teplot připojen k dynamometru, zatížen jmenovitým výkonem a to 7,5 kW. Pro přesné určení teplot při jmenovitém výkonu je nutné dosáhnout ustáleného stavu. [30][31][32]

Tab. 23 Naměřené teploty v elektromotoru a ložiscích

SKF E2. 6208-2Z/C3	-	ORS 620850 – C3
[°C]	-	[°C]
52,47	Vnější kroužek ložiska ZS	57,34
40,85	Vnější kroužek ložiska PS	45,20
42,98	Kostra ZS	46,14
44,21	Kostra Střed	46,98
37,20	Kostra PS	39,93
94,26	Čelo vinutí ZS (U)	98,41
99,57	Čelo Vinutí ZS (V)	104,2
95,44	Čelo Vinutí ZS (W)	100,5
97,65	Čelo Vinutí PS (U)	102,0
93,41	Čelo vinutí PS (V)	97,38
90,60	Čelo vinutí PS (W)	95,01
20,75	Vnější teplota čidlo 1	22,78
20,43	Vnější teplota čidlo 2	22,47



Obr. 43 Průběh jednotlivých teplot u elektromotoru osazeného ložisky SKF E2



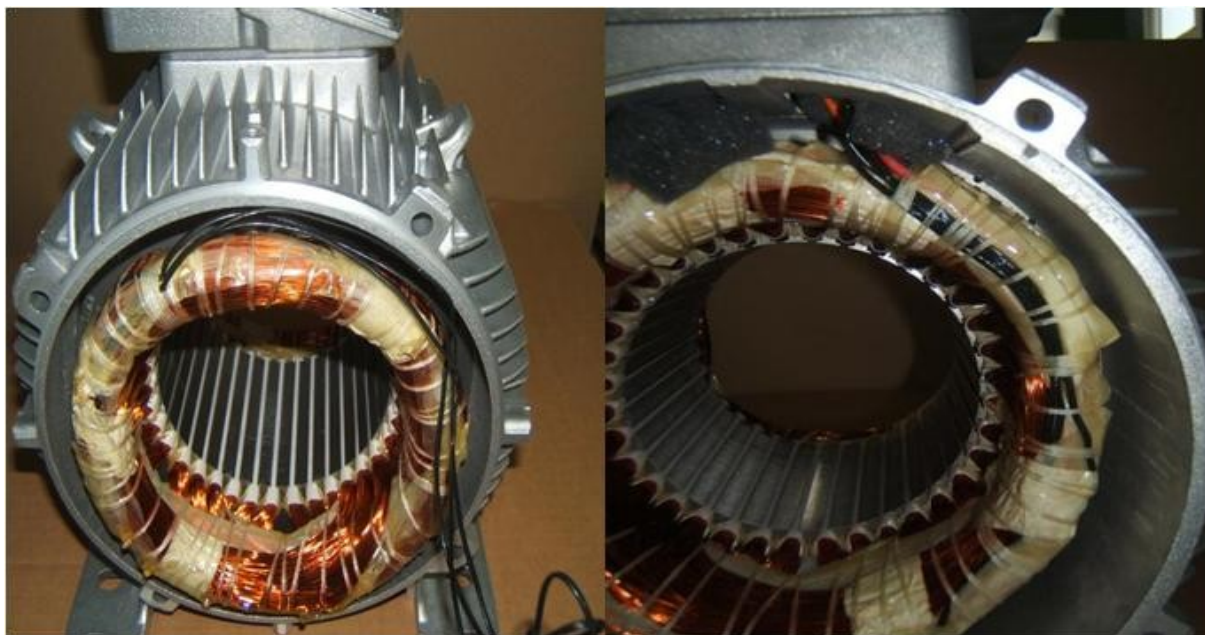
Obr. 44 Průběh jednotlivých teplot u elektromotoru osazeného ložisky ORS

Tab. 24 Označení jednotlivých teplotních čidel ve výše uvedených grafech

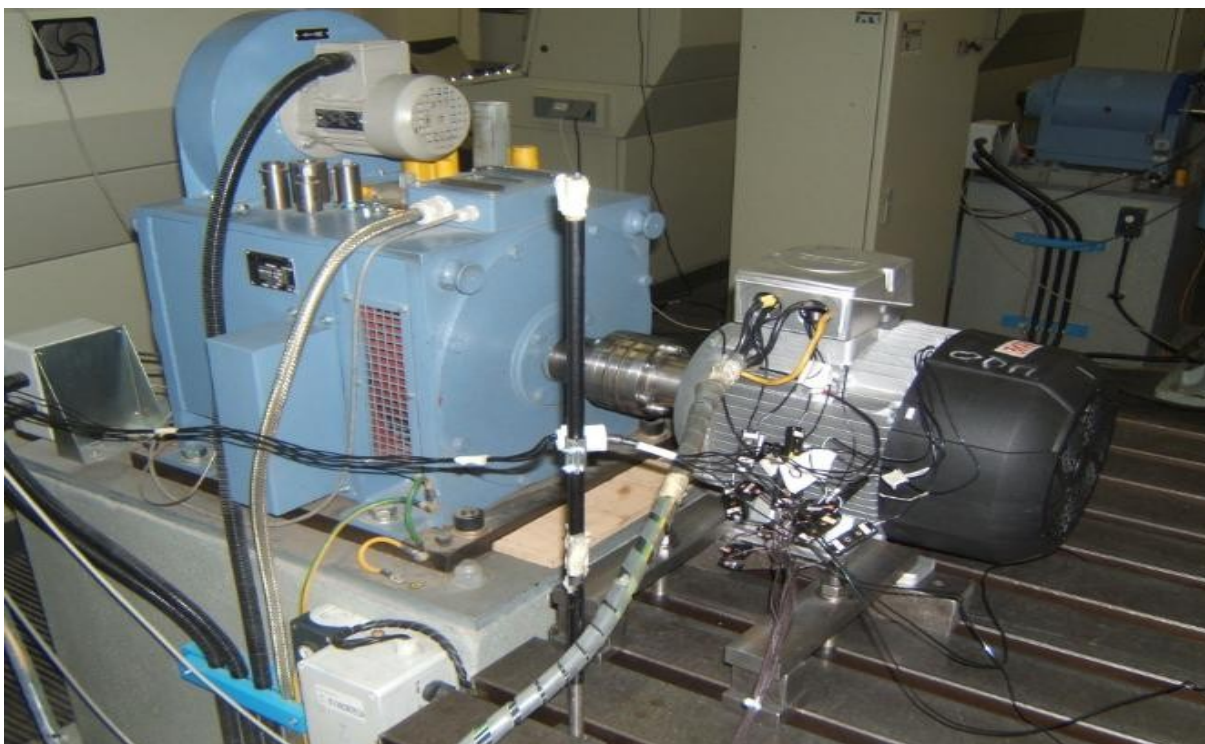
Označení	Umístění	Označení v grafu [Barva]
T01	Čelo vinutí ZS (U)	
T02	Čelo vinutí ZS (V)	
T03	Čelo vinutí ZS (W)	
T04	Čelo vinutí PS (U)	
T05	Čelo vinutí PS (V)	
T06	Čelo vinutí PS (W)	
T07	Kostra ZS	
T08	Kostra Střed	
T09	Kostra PS	
T17	Vnější kroužek ložiska ZS	
T18	Vnější kroužek ložiska PS	



Obr. 45 Svařený termočlánek a svářečka termočláneků Omega TL-WELD



Obr. 46 Umístění termočládků ve statorovém svazku



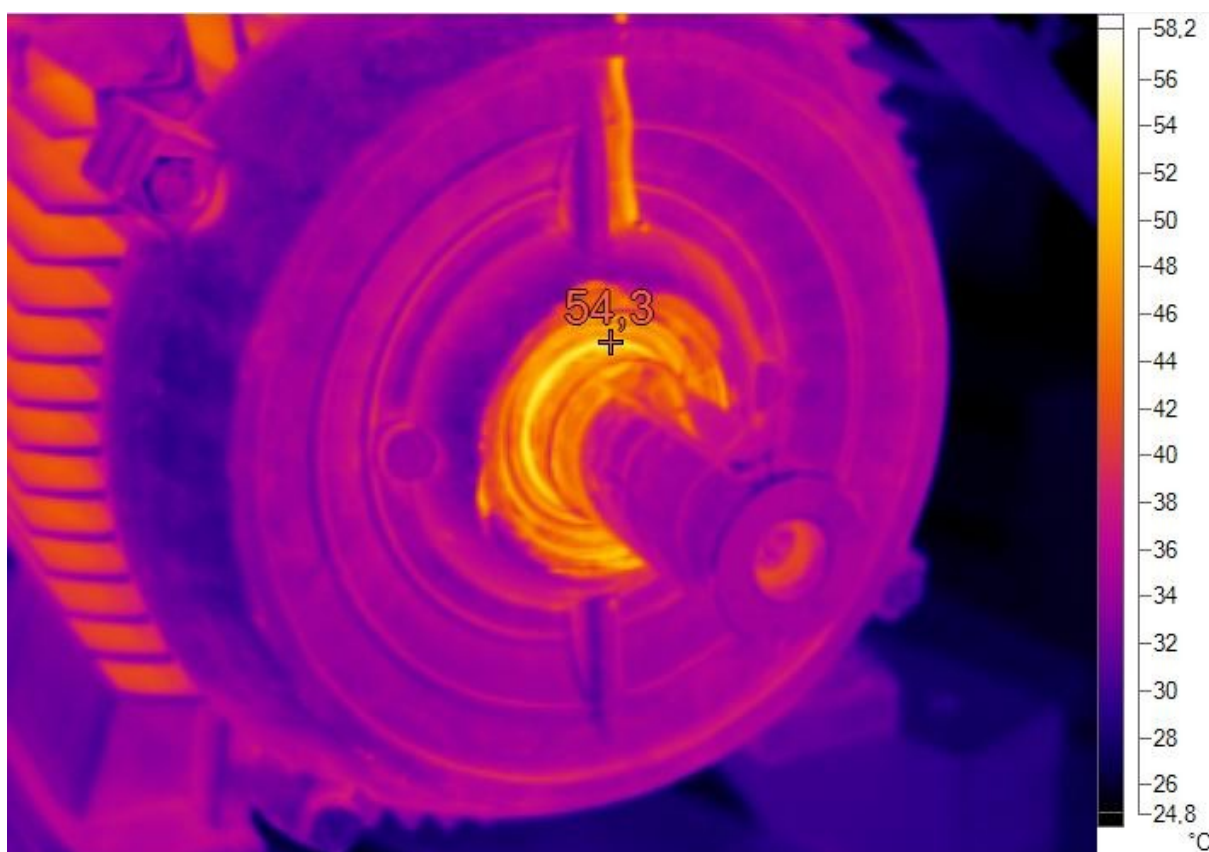
Obr. 47 Elektromotor v průběhu snímání teplot pomocí termočládků

Dále byly provedeny termosnímky elektromotoru osazeného ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3 a ORS 620850 – C3 za pomoci termokamery Fluke Ti32, která díky rozlišení 320x240 pixelů je schopna vytvářet ostré a velmi jasné snímky. Tato termokamera je určena pro snímání teplot v rozsahu od -20°C do $+600^{\circ}\text{C}$, kdy přesnost snímání teploty se pohybuje v rozmezí $\pm 2^{\circ}$ při maximální vnější teplotě od -10°C do $+50^{\circ}\text{C}$. Termokameru je možné

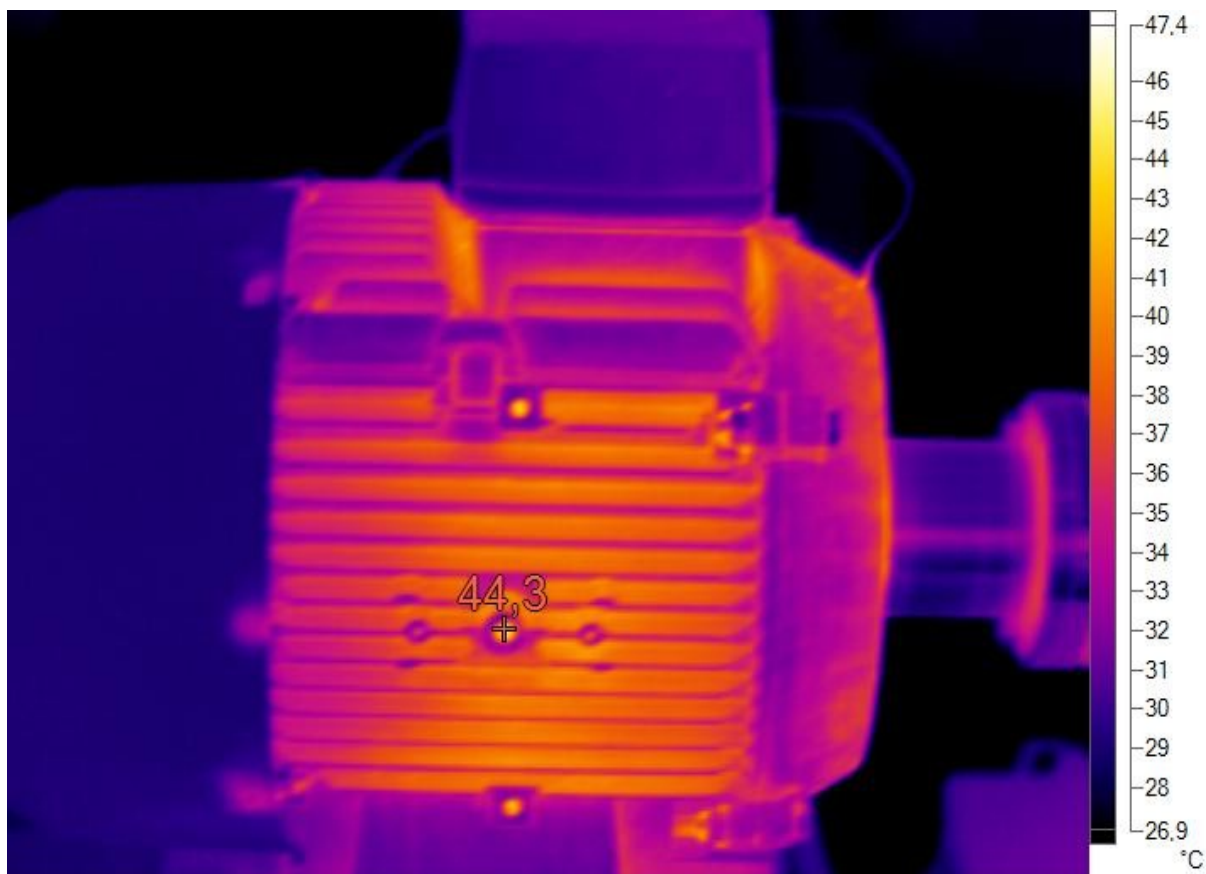
využít díky krytí IP54 v prašném prostředí a na místech, kde je možnost kontaktu s volně stříkající vodou.[33]



Obr. 48 Termokamera Fluke Ti32



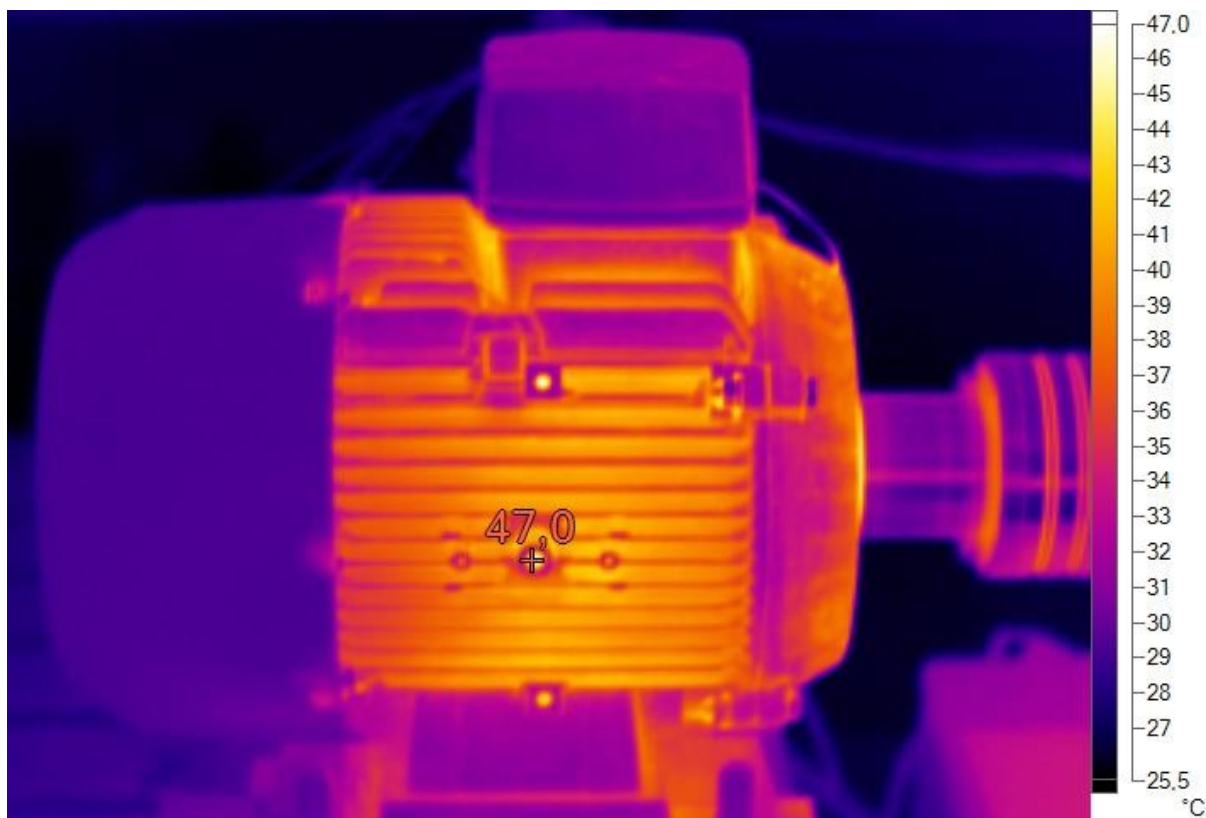
Obr. 49 Termosnímek elektromotoru osazeného ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3



Obr. 50 Termosnímek elektromotoru osazeného ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3



Obr. 51 Termosnímek elektromotoru osazeného ložisky ORS 620850 - C3

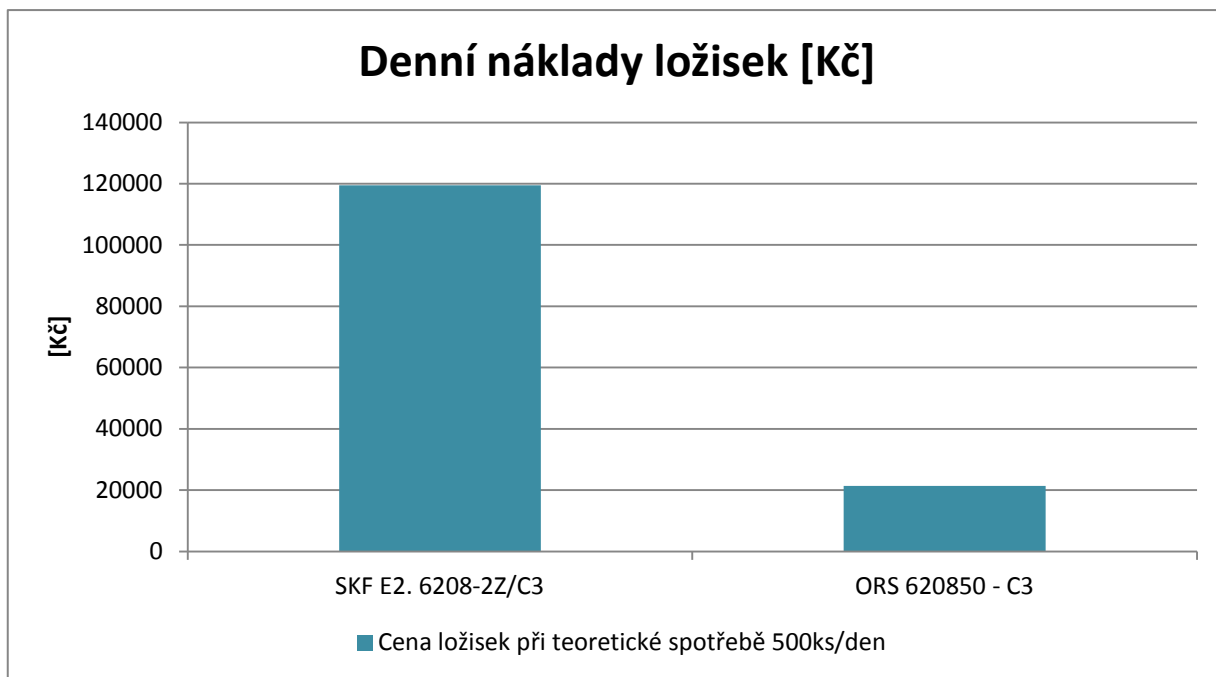


Obr. 52 Termosnímek elektromotoru osazeného ložisky ORS 620850 – C3

Teploty, které byly naměřeny na ložiscích SKF E2. 6208-2Z/C3, byly o 5 °C nižší než v případě ložisek od společnosti ORS. Z grafů na obrázcích 39 a 40 je patrný výrazně lineárnější průběh teplot v případě ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3 v porovnání s ložisky ORS 620850 – C3 a také je možné u ložisek SKF pozorovat stálost měřených teplot v průběhu zkoušky. U ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3 je díky nižším teplotám a celkové stálosti teplot v průběhu zkoušky vyšší pravděpodobnost delší životnosti v porovnání s ložisky od společnosti ORS. V této zkoušce dopadly výrazně lépe ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3 a zároveň se potvrdila prohlášení výrobce, že při otáčkách 3000 min^{-1} dosahují tato ložiska o 5 °C nižší teploty v porovnání s ostatními ložisky, která mohou být osazena v elektromotoru.

4. Ekonomické zhodnocení použití vysokoúčinnostních ložisek SKF E2

Vysokoúčinnostní ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3 jsou vhodná především k použití v elektromotorech, pro které jsou speciálně zkonstruována. Velkoobchodní cena těchto ložisek bez DPH 21% je 238,90 Kč, což představuje při čistě teoreticky předpokládaném odběru celkem 500 ks za den částku 119 450,00 Kč bez DPH. Cena standardně dodávaných ložisek ORS 620850 – C3 je 42,80 Kč bez DPH 21%, což představuje celkové denní náklady při čistě teoretickém odběru 500 ks za den částku 21 400,00 Kč bez DPH. Rozdíl obou částek je celkem 98 050,00 Kč bez DPH, který je poměrně značný. Ceny ložisek byly zjištěny od dealera společnosti Arkov formou poptávky. Z ekonomického hlediska je výhodnější použití ložisek ORS. Tato ložiska je možné využít především v aplikacích, kde elektromotor bude standardně namáhán z důvodu dosahování vyšších teplot v porovnání s ložisky SKF E2. 6208-2Z/C3. Ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3 je naopak velmi vhodné využívat v aplikacích, kde elektromotor bude velmi zatěžován, protože jsou schopna zajistit stálou a bezproblémovou funkčnost díky nižší produkci tepla v porovnání s ložisky ORS. Aplikací ložisek SKF E2 je také možné získat elektromotor s vyšší účinností a celkově velmi klidným chodem v porovnání s elektromotorem, který je osazen standardně dodávanými ložisky ORS 620850 – C3.



Obr. 53 Denní náklady ložisek



Závěr diplomové práce

Diplomová práce se zabývala komplexními zkouškami nízkonapětových asynchronních elektromotorů k prokázání vlastností energeticky účinných ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3 v porovnání se standardně dodávanými ložisky ORS 620850 – C3. Veškeré potřebné zkoušky probíhaly ve společnosti Siemens elektromotory o.z. Mohelnice na jednom vzorku elektromotoru Siemens 1LE1005 – 1CA134 osově výšky 132 mm, u kterého byla pouze vyměněna ložiska. Ložiska pro tuto práci byla zvolena ve dvou kvalitativních spektrech, kdy cena ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3 byla 238,90 Kč bez DPH a ložiska ORS 620850 – C3 42,80 Kč bez DPH. U těchto dvou typů ložisek jsme se snažili prokázat rozdíly především v účinnosti a mechanických ztrátách a dále celkové výhody, které mohou přinést právě ložiska SKF E2 v porovnání se standardně dodávanými ložisky od společnosti ORS. Z těchto důvodů byla ložiska v elektromotoru podrobena čtyřem zkouškám, kdy první z nich bylo ověření mohutnosti vibrací dle ČSN EN 60034 – 14, druhou zkouškou byla zkouška ověření hlučnosti dle ČSN EN ISO 3745, třetí zkouškou bylo ověřování účinnosti a ztrát dle normy ČSN EN 60034 – 2 – 1, poslední zkouškou bylo snímání teplot celkem na jedenácti různých místech elektromotoru především teploty ložisek.

První zkouškou, která byla provedena, bylo měření hladiny mohutnosti vibrací dle normy ČSN EN 60034 – 14. Tato norma předepisuje měření vibrací na celkem šesti místech elektromotoru. Naše měření bylo ovšem provedeno na pěti místech elektromotoru z důvodu, že šesté místo je na místě ventilátoru, který bychom byli nuceni demontovat. Ventilátor demontován nebude z důvodu, protože je součástí elektromotoru a jeho demontáží by byly celkové vibrace příliš zkresleny. Pro měření byla využita čidla Adash 125, která byla k elektromotoru připevněna za pomoci červeného včelího vosku z důvodu, protože kostra a oba štíty elektromotoru jsou z hliníku. Tento způsob byl zvolen i z důvodu, protože při použití včelího vosku je možné dosahovat rezonancí na kmitočtech až 20 kHz a zároveň nedojde k poškození povrchu elektromotoru. Měření bylo dle normy provedeno jak na pružné podložce ze Sylomeru SR 11, tak také pevným uložením elektromotoru na pracovním stole. V obou případech byl elektromotor měřen bez zátěže. Výsledky jak v pruženém, tak v pevném uložení plně odpovídaly normě ČSN EN 60034 – 14, kdy výsledky byly v průměru o 70% nižší než maximální hodnoty, které předepisuje norma. V měření hladiny mohutnosti vibrací byla obě ložiska srovnatelná, i když o málo lepší výsledky vykazovala ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3.

Druhou provedenou zkouškou byla zkouška hluková dle normy ČSN EN ISO 3745. Měřenou hodnotou je hodnota akustického tlaku (Pa), ze které je nutné vypočítat hodnotu akustického výkonu, která je uváděna v decibelech (dB). Měření byla provedena v polobezodrazové hlukové komoře ve společnosti Siemens s.r.o., Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice za pomoci celkem deseti mikrofونů B&K 4942 umístěných v tzv. polokouli. Elektromotor, byl během měření umístěn uprostřed polobeodrazové hlukové komory a byl zkoušen naprázdno, tzn. že měření probíhalo bez jakékoliv zátěže elektromotoru. Před každým ověřováním hlučnosti byla provedena kalibrace všech měřicích přístrojů a v průběhu každého měření byly udržovány stejné klimatické podmínky. Měření bylo provedeno ve frekvenčním rozsahu od 160 Hz do 10000 Hz, kdy na každé frekvenci proběhlo měření po dobu 30 s. Výsledky obou měření plně odpovídaly normě ČSN EN 60034 – 9, která předepisuje maximální hladinu akustického výkonu 85 dB. Hodnoty našeho měření byly v průměru o 9,5% nižší, než které předepisuje norma. V případě ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3 byla naměřena hodnota akustického výkonu 76,93 dB a u ložiska ORS 620850 – C3 77,29 dB. Z těchto výsledků vyplývá, že v případě ověřování hlučnosti vyšla o málo lépe ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3, což však v tomto případě lze považovat za toleranci měření, která je v tomto typu hlukové komory $\pm 0,5$ dB.

Třetí provedenou zkouškou bylo určení účinnosti a ztrát elektromotoru dle normy ČSN EN 60034 – 2 – 1. Energetickou účinnost je možné vyjádřit jako podíl využité energie vůči vložené a bývá zpravidla uváděna v procentech. Elektromotor je během zkoušky zatížen dynamometrem na jmenovitý výkon a teplotně stabilizován. Dále bylo provedeno měření naprázdno k určení dílčích složek ztrát. Celková účinnost byla vyšší u ložisek SKF SKF E2. 6208-2Z/C3, a to o 0,61%. Metoda výpočtu účinnosti elektromotoru vychází z normy ČSN EN 60034 – 2 – 1. Tato norma vychází ze stanovení jednotlivých příspěvků ztrát v elektromotoru. Budeme-li vyšetřovat příspěvek ztrát způsobených třením v ložiscích, je příspěvek ztrát ložisek SKF E2. 6208 – 2Z/C3 přibližně o 20 W nižší. Toto má za následek zvýšení účinnosti o cca 0,3 %. Tento příspěvek je měřitelný, není však v celkové účinnosti elektromotoru příliš významný.

Poslední provedenou zkouškou bylo snímání teplot ložisek a elektromotoru v ustáleném stavu při jmenovitém výkonu. Snímání teploty bylo provedeno celkem na jedenácti místech elektromotoru za pomoci termočlánků od společnosti Omega Engineering Inc.



typu J. Naměřené teploty na vnějších kroužcích ložisek byly o 5°C nižší v případě ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3, kdy naměřené teploty byly u ložiska SKF E2. 6208-2Z/C3 $52,47^{\circ}\text{C}$ a u ložiska ORS 620850 – C3 $57,34^{\circ}\text{C}$. Při této zkoušce dopadla výrazně lépe ložiska SKF E2., u kterých je díky nižším dosahovaným teplotám pravděpodobnost delší životnosti. V případě naměřených teplot ložiska SKF E2. splnila plně deklaraci výrobce, že při otáčkách 3000 min^{-1} bude dosaženo teplot o 5°C nižších než u ložisek standardních. Z těchto a dalších naměřených výsledků z ostatních zkoušek vyplývá, že u ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3 je pravděpodobnost delší životnosti, proto je vhodnější jejich využití ve vysoce zatěžovaných elektromotorech. Naopak ložiska ORS 620850 – C3 je vhodné využívat v elektromotorech, které jsou standardně zatěžovány. Právě dosahování nižší provozní teploty ložisek je nejvyšším přínosem ložisek SKF E2. 6208-2Z/C3.



Poděkování

Rád bych poděkoval za cenné rady a připomínky při zpracování práce Ing. Ivo Tkáčovi a Františku Škopovi ze společnosti Společnost Siemens s.r.o., Odštěpný závod Elektromotory Mohelnice a Ing.et.Ing.Mgr. Janě Petřů, Ph.D. z katedry obrábění a montáže VŠB-TUO Ostrava.



Seznam použité literatury

- [1] Princip - asynchronní motor. *Pohonnatechnika.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor>
- [2] Introduction to Premium Efficiency Motors. *Cooper Development Association Inc.* [online]. 2013 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: http://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/education/motor_text.html
- [3] Jak se dělá elektromotor. *Elektro - časopis pro elektrotechniku* [online]. Náchod, 2011 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42921.pdf>
- [4] Elektromotor SIEMENS. Vlastimil Moravec Elektromotory [online]. 2011 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.elektromotory.net>
- [5] Rotor blenche und rotoren. *EMT - Ingenieurbüro für Elektro-Maschinenbau* [online]. 2011 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.emt-net.de/motorkomponenten/rotorpaket.html>
- [6] Princip - Synchronní motor. *Pohonnatechnika.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/synchronni-motor>
- [7] The difference between asynchronous and synchronous motors. *Machine design* [online]. 2013 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/motorsdrives/difference-between-asynchronous-and-synchronous-motors>
- [8] Rotor/ stator unit for permanent magnets synchronous motor. *Direct Industry* [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/leroy-somer/rotor-stator-units-permanent-magnets-synchronous-motors-8355-962545.html>
- [9] Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Mohelnice. Siemens [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/industry/OZ_Mohelnice/Pages/Elektromotory_Mohelnice.aspx
- [10] Energeticky účinná (E2) ložiska SKF. SKF [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact->



ball-bearings/double-row-angular-contact-ball-bearings/skf-energy-efficient-e2-bearings/index.html

[11] BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů II. Hřídele, tribologie, ložiska*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1987, 215 s.

[12] KUNZOVÁ, Ivana. Přednáška č.10 Ložiska. VŠB [online]. 2012 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.347.vsb.cz/staff/kunzova/zs-kunzova-prednaska10.pdf>

[13] Mazání ložisek. ZKL GROUP [online]. 2012 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/9-mazani-lozisek>

[14] POŠTA, Josef, Milan DVOŘÁK a Petr VESELÝ. Degradace strojních součástí: monografie. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0967-9.

[15] Wheel Bearing Service Tips. AASA - Know your parts [online]. 2011 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.knowyourparts.com/product-category/wheel-bearing-service-tips/>

[16] Ložiskové proudy a jejich degradační působení. Elektro - časopis pro elektrotechniku [online]. 2014 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25552

[17] New bearing doctor. NSK [online]. 2008 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctr/index.cgi?gr=dn&pno=E7005>

[18] Diagnostika valivých ložisek. ADASH [online]. 2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://www.adash.cz/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_info_cz.pdf

[19] Ohřívací zařízení ložisek. SKF [online]. 2013 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/maintenance-products/bearing-heaters/index.html?gclid=CPCliYyc8rwCFUjItAod218Alw>

[20] Energeticky účinná (E2) kuličková ložiska SKF. SKF GROUP [online]. 2012 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/skf-energy-efficient-e2-deep-groove-ball-bearings/index.html>



- [21] ORS Bearings. ORS [online]. 2014 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.ors.com.tr/index.php/en/home>
- [22] Elektromotor SIEMENS. Vlastimil Moravec Elektromotory [online]. 2011 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.elektromotory.net/siemens/1la9-3000-otacek/1le1001-6-1-2-1.html>
- [23] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [24] ČSN EN 60034-14. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [25] SIEMENS. *Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací ČSN EN 60034-14*. Mohelnice, 2010.
- [26] ČSN EN ISO 3745. *Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [27] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [28] ČSN EN 60 034-9. *Točivé elektrické stroje - Část 9: Mezní hodnoty hluku*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [29] ČSN EN 60034 – 2 – 1. Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek s výjimkou strojů pro trakční vozidla. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [30] Termoelektrický článek. VUTBR. Ústav mikroelektroniky [online]. 2012 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_8_2.htm
- [31] Wire Color Codes and Limits of Error. OMEGA [online]. 2014 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.omega.com/techref/colorcodes.html>
- [32] Měření teploty termočlánky. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření [online]. 2013 [cit. 2014-04-21]. Dostupné



z:http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/cviceni/02_termoclanky.pdf

[33] Průmyslová termokamera Fluke Ti32. Fluke [online]. 2012 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z:[http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/fluke-ti32-\(europe\).htm?PID=56185](http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/fluke-ti32-(europe).htm?PID=56185)